



TESIS BM185407

**PENENTUAN INTERVAL PEMELIHARAAN
PENCEGAHAN DENGAN *SYSTEM EQUIPMENT
RELIABILITY PRIORITIZATION* (SERP) DAN
OPTIMASI KEANDALAN PADA TURBIN GAS
SERI M701D (STUDI KASUS DI PT. Z)**

**EKO DARMAWAN JATMIKO
09211650014028**

**DOSEN PEMBIMBING
Dr. Ir. Mokh. Suef, M.Sc. (Eng.)**

**DEPARTEMEN MANAJEMEN TEKNOLOGI
BIDANG KEAHLIAN MANAJEMEN INDUSTRI
FAKULTAS BISNIS DAN MANAJEMEN TEKNOLOGI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2019**

LEMBAR PENGESAHAN

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Manajemen Teknologi (M.MT)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

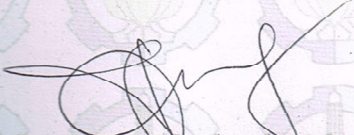
EKO DARMAWAN JATMIKO

NRP. 09211650014028


Tanggal Ujian : 14 Januari 2019

Periode Wisuda : Maret 2019

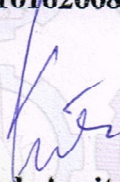
Disetujui oleh:


1. **Dr. Ir. Mokh. Suef, M.Sc (Eng)**
NIP. 196506301990031002

(Pembimbing)


2. **Dr. Adithva Sudiarno, ST, MT**
NIP. 198310162008011006

(Penguji)


3. **Niniet Indah Arvitrida, ST, MT, PhD**
NIP. 198407062009122007

(Penguji)

Dekan Fakultas Bisnis dan Manajemen Teknologi,




Prof. Dr. H. Udisubakti Ciptomulyono, M.Eng.Sc
NIP. 19590318-198701 1 001

**PENENTUAN INTERVAL PEMELIHARAAN PENCEGAHAN
DENGAN *SYSTEM EQUIPMENT RELIABILITY
PRIORITIZATION* (SERP) DAN OPTIMASI KEANDALAN
PADATURBIN GAS SERI M701D
(STUDI KASUS DI PT. Z)**

Nama : Eko Darmawan Jatmiko
NRP : 09211650014028
Dosen Pembimbing : Dr. Ir. Mokh. Suef, M.Sc. (Eng.)

ABSTRAK

PT. Z merupakan salah satu pemasok listrik terbesar di area Jawa Madura Bali (Jamali). Perusahaan ini mengelola Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) dengan kapasitas total produksi sebesar 1.500 MegaWatt. Salah satu mesin utama PLTGU yaitu turbin gas, yang mana memegang peran vital dalam proses produksi listrik. Apabila terjadi kegagalan pada salah satu peralatan turbin gas, maka keandalan mesin tersebut menjadi berkurang. Selain itu dampak yang tidak diinginkan adalah *breakdown* pada turbin gas. Hal ini menyebabkan kerugian besar, yaitu biaya pemeliharaan yang semakin besar dan berkurangnya kesempatan memproduksi listrik. Turbin gas blok 2 memiliki pola operasi dengan jumlah *start-stop* lebih tinggi dibandingkan dengan lainnya, sehingga potensi kegagalan lebih sering terjadi. Perusahaan ini telah memiliki jadwal pemeliharaan pencegahan, namun masih sering terjadi kegagalan sebelum dilakukan pemeliharaan pencegahan. Oleh karena itu perlu ditentukan interval waktu pemeliharaan pencegahan yang tepat agar keandalan turbin gas terjaga dan meminimalkan total biaya pemeliharaan.

Penelitian ini dimulai dengan menentukan *top ten* dari *maintenance priority index* (MPI) peralatan-peralatan turbin gas dengan metode *System Equipment Reliability Prioritization* (SERP), selanjutnya dilakukan pengujian distribusi data dan ditentukan parameter sesuai dengan jenis distribusinya dengan menggunakan perangkat lunak *Weibull++* 6. Kemudian menentukan keandalan sisa masing-masing peralatan turbin gas dan keandalan sistem turbin gas, serta dilakukan penentuan biaya pemeliharaan sebelum dilakukan optimasi keandalan. Setelah itu dilakukan optimasi keandalan dengan target sesuai kinerja manajemen PT. Z dengan menggunakan perangkat lunak *Lingo* 17.0. Kemudian ditentukan interval waktu pemeliharaan pencegahan dan biaya pemeliharaan setelah dilakukan optimasi keandalan.

Dari hasil penelitian diperoleh peralatan turbin gas yang masuk peringkat sepuluh besar MPI adalah turbin, *rotor cooling air*, *exciter set*, generator, *combuster shell*, *main transformer*, *piping fuel gas supply*, *main lube oil system*, *compressor* dan *digital controller*. Kemudian total biaya penghematan pemeliharaan pencegahan selama satu tahun dengan target keandalan sistem turbin gas 0,9 terbesar pada peralatan turbin dengan total penghematan biaya

pemeliharaan sebesar IDR 145.174.877,40. Dengan target keandalan yang sama diperoleh interval waktu pemeliharaan pencegahan terpanjang pada peralatan *Main lube oil system* yaitu 1101,5112 jam.

Kata Kunci: Interval waktu pemeliharaan pencegahan, *maintenance priority index, system equipment reliability prioritization.*

DETERMINATION OF PREVENTIVE MAINTENANCE INTERVALS BY MEANS OF SYSTEM EQUIPMENT RELIABILITY PRIORITIZATION (SERP) AND RELIABILITY OPTIMIZATION ON THE GAS TURBINE M701D SERIES

Name : Eko Darmawan Jatmiko
NRP : 09211620014028
Supervisor : Dr. Ir. Mokh. Suf, M.Sc. (Eng.)

ABSTRACT

PT. Z is one of the largest electricity suppliers in the Java Madura Bali (Jamali) area. The company manages the Combined Cycle Power Plant (CCPP) with a total production capacity of 1,500 MegaWatts. One of the main engines of the CCPP is the gas turbine, which plays a vital role in the electricity production process. If there any failure in one of the gas turbine equipment, the reliability of the engine will be reduced. In addition, the unwanted impact is a breakdown of the gas turbine. This caused huge losses in the form greater maintenance costs and reduced opportunities to produce electricity. Gas turbine on Block 2 has an operating pattern with a higher number of start-stops than others, so that the potential for failure is more often. This company has a preventive maintenance schedule, but failure often occurs before preventive maintenance is carried out. Therefore it is necessary to determine the appropriate preventive maintenance interval so that the reliability of the gas turbine is maintained and minimizes the total maintenance costs.

This research begins by determining the top ten from maintenance priority index (MPI) gas turbine equipment using the System Equipment Reliability Prioritization (SERP) method, then testing the data distribution and determining the parameters according to the type of distribution using Weibull++ 6 software. Then determine the reliability of the remainder of each gas turbine equipment and the reliability of the gas turbine system, along with determination of maintenance costs before reliability optimization is carried out. After that, reliability optimization was carried out with the target according to the management performance of PT. Z by using Lingo 17.0 software. Then the preventive maintenance time interval and maintenance costs are determined after reliability optimization.

The results of the research show gas turbine equipment which is ranked in the top ten MPI is turbine, rotor cooling air, exciter set, generator, combustor shell, main transformers, piping fuel gas supply, main lube oil system, compressor and digital controller. Then the total cost of preventive maintenance for one year on the gas turbine system reliability target of 0.9 is the largest in turbine equipment with a total savings of maintenance costs of IDR 145,174,877.40. With the same reliability target, the longest preventive maintenance interval is obtained on the Main lube oil system equipment is 1101.5112 hours.

Keywords: Preventive maintenance time interval, maintenance priority index, system equipment reliability prioritization.

KATA PENGANTAR

Syukur Alhamdulillah Robbil 'Alamin, atas segala rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis ini dengan judul “Penentuan Interval Pemeliharaan Pencegahan dengan *System Equipment Reliability Prioritization* (SERP) dan Optimasi Keandalan pada Turbin Gas Seri M701D (Studi Kasus di PT. Z)”.

Tesis ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Manajemen Teknologi pada Jurusan Manajemen Industri MMT-ITS.

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Segenap keluarga dan Orang tua tercinta yang telah memberikan dukungan dan doanya kepada penulis untuk menyelesaikan tesis.
2. Bapak Dr. Ir. Mokh. Suef, M.Sc (Eng) sebagai dosen pembimbing tesis, Bapak Dr. Adithya Sudiarno, ST, MT dan Ibu Niniet Indah Arvitrida, ST, MT, PhD sebagai dosen penguji tesis yang telah memberikan banyak arahan dan bimbingannya dalam pengerjaan tesis ini.
3. Teman-teman angkatan Manajemen Industri yang telah banyak membantu dari proses perkuliahan sampai penyelesaian tesis.
4. Rekan-rekan kerja di PT. PJB PJB Unit Pembangkitan Gresik yang telah banyak memberikan dukungan, ide serta gagasannya dalam menyelesaikan tesis.
5. Seluruh keluarga besar MMT - ITS, para dosen pengajar, karyawan, dan mahasiswa yang telah banyak memberi ilmu dan bantuan selama penulis menempuh kuliah.

Penulis menyadari bahwa Tesis ini belum sempurna, oleh karena itu saran dan masukan sangat diharapkan untuk perbaikan di masa yang akan datang. Semoga Tesis ini bermanfaat bagi pembaca dan masyarakat pada umumnya.

Surabaya, Januari 2019

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Batasan Penelitian	5
1.5 Asumsi Penelitian	6
1.6 Manfaat Penelitian	6
1.7 Sistematika Penulisan	6
5.1 Penentuan Interval Pemeliharaan Optimal	7
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1 Sistem Pembangkit Listrik	9
2.2 Manajemen Pemeliharaan	14
2.3 <i>System & Equipment Reliability Prioritization (SERP)</i>	16
2.4 Keandalan	21
2.5 <i>Mean Time Between Failure (MTBF)</i>	22
2.6 <i>Mean Time to Repair (MTTR)</i>	22
2.7 Laju Kegagalan (<i>Failure Rate</i>)	22
2.8 Karakteristik Kegagalan	23
2.8.1 <i>Burn-in Zone (Early Life)</i>	24
2.8.2 <i>Useful Life Time Zone</i>	24
2.8.3 <i>Wear Out Zone</i>	24
2.9 Distribusi Kegagalan	24
2.9.1 Distribusi Normal	25
2.9.2 Distribusi <i>Weibull</i>	25

2.9.3 Distribusi <i>Lognormal</i>	26
2.9.4 Distribusi <i>Eksponensial</i>	26
2.9.5 <i>Reliability System</i>	26
2.10 Pengujian Distribusi.....	28
2.11 Penetapan Keandalan Optimal	29
2.12 Analisa Biaya Pemeliharaan	32
2.13 Posisi Penelitian	32
BAB 3 METODE PENELITIAN	35
3.1 Studi Lapangan dan Pustaka	35
3.2 Penetapan Perumusan Masalah dan Tujuan Penelitian.....	35
3.3 Pengumpulan Data	38
3.4 Pengolahan Data	38
3.5 Kesimpulan dan Saran	39
BAB 4 PENGOLAHAN DATA	41
4.1 <i>System & Equipment Reliability Prioritization (SERP)</i>	41
4.2 Analisis keandalan peralatan turbin gas.....	52
BAB 5 OPTIMASI KEANDALAN	71
5.1 Penentuan Interval Pemeliharaan Pencegahan Optimal	71
5.2 Analisa Biaya Pemeliharaan	74
BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN	79
6.1 Kesimpulan	79
6.2 Saran	80
DAFTAR PUSTAKA.....	81
LAMPIRAN	83
Lampiran A <i>System & Equipment Reliability Prioritization (SERP)</i>	83
Lampiran B Data <i>time between failure (TBF)</i>	89
Lampiran C Optimasi keandalan dengan <i>Lingo</i>	93

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Siklus Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap.....	1
Gambar 1. 2 Capacity factor	2
Gambar 1. 3 Grafik Pemakaian listrik area Jawa Madura Bali (Jamali).....	3
Gambar 1. 4 Sistem dan sub sistem turbin gas	4
Gambar 2.1 Sistem turbin gas.....	10
Gambar 2. 2 Sudu kompressor	11
Gambar 2. 3 Turbin gas.....	13
Gambar 2. 4 Jenis kegiatan pemeliharaan.....	14
Gambar 2. 5 Kurva laju kegagalan.....	23
Gambar 2. 6 Sistem seri	27
Gambar 2. 7 Sistem Paralel.....	28
Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian.....	37
Gambar 4. 1 Komponen turbin.....	43
Gambar 4. 2 Rotor Cooling Air (RCA).....	44
Gambar 4. 3 Exciter set.....	45
Gambar 4. 4 Generator	46
Gambar 4. 5 Combuster shell.....	47
Gambar 4. 6 Main transformer.....	48
Gambar 4. 7 Control valve bahan bakar gas	49
Gambar 4. 8 Main lube oil system	50
Gambar 4. 9 Inlet Guide Vane	51
Gambar 4. 10 Digital Controller (DDC)	52

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1 Jumlah start-stop turbin gas	2
Tabel 1. 2 Frekuensi kerusakan peralatan turbin gas	4
Tabel 2. 1 Kriteria Operational Cost (OC).....	18
Tabel 2. 2 Kriteria Process Throughput/ Availability (PT).....	18
Tabel 2. 3 Kriteria Product Quality (PQ).....	18
Tabel 2. 4 Kriteria Safety Factor (SF).....	19
Tabel 2. 5 Kriteria Regulatory/ Enviromental Compliance (RC)	19
Tabel 2. 6 Kriteria Plant Efficiency (PE)	19
Tabel 2. 7 Kriteria Recovery Time (RT).....	19
Tabel 2. 8 Kriteria Operational Criticality Ranking (OCR).....	20
Tabel 2. 9 Asset Failure Probability Factor (AFPF)	21
Tabel 4. 1 Maintenance Prioritization Index (MPI) turbin gas	42
Tabel 4. 2 Tabel uji distribusi peralatan turbin	52
Tabel 4. 3 Tabel uji distribusi peralatan combuster	54
Tabel 4. 4 Tabel uji distribusi peralatan RCA.....	55
Tabel 4. 5 Tabel uji distribusi peralatan exciter	57
Tabel 4. 6 Tabel uji distribusi peralatan generator.....	58
Tabel 4. 7 Tabel uji distribusi peralatan MTR	60
Tabel 4. 8 Tabel uji distribusi peralatan fuel gas system	61
Tabel 4. 9 Tabel uji distribusi peralatan MOT	63
Tabel 4. 10 Tabel uji distribusi peralatan compressor	64
Tabel 4. 11 Tabel uji distribusi peralatan DDC	66
Tabel 4. 12 Parameter hasil uji distribusi.....	67
Tabel 4. 13 Fungsi padat peluang	67
Tabel 4. 14 Fungsi keandalan	68
Tabel 4. 15 Keandalan residual equipment gas turbin	69
Tabel 5. 1 Kontrak kinerja PT. Z	71
Tabel 5. 2 Hasil optimasi keandalan	73
Tabel 5. 3 Interval waktu pemeliharaan optimal.....	74

Tabel 5. 4 Biaya pemeliharaan sebelum dilakukan optimasi keandalan	75
Tabel 5. 5 Biaya pemeliharaan setelah optimasi keandalan	76
Tabel 5. 6 Penghematan biaya pemeliharaan	76

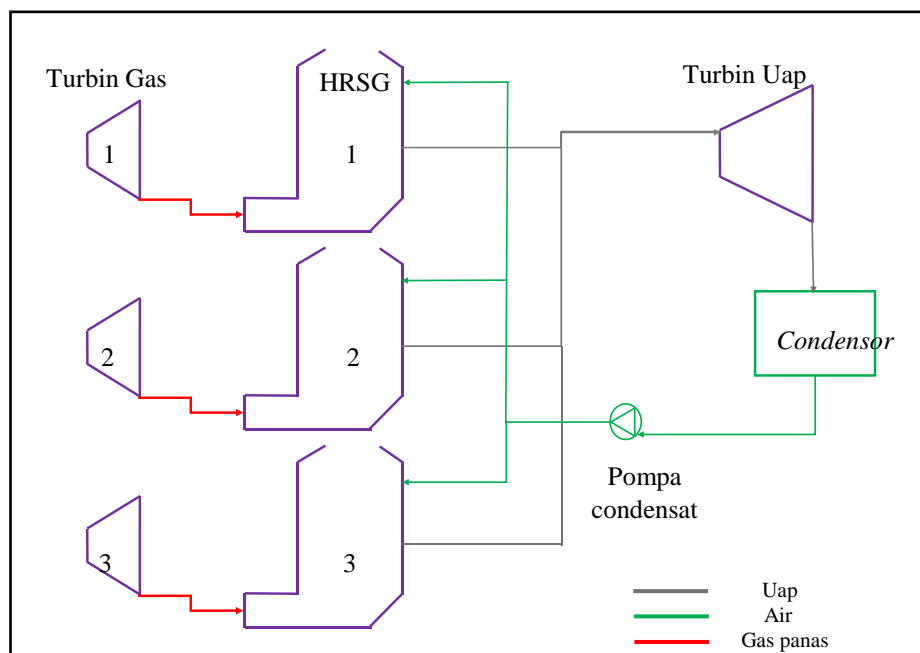
BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

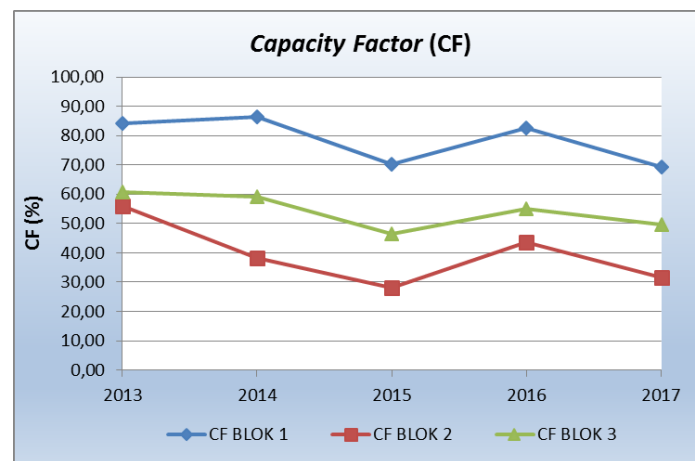
Listrik merupakan salah satu kebutuhan primer saat ini dan mendatang. Oleh karena itu pasokan listrik dari produsen ke konsumen harus andal agar kebutuhan tersebut terpenuhi. PT. Z merupakan perusahaan yang bergerak di bidang pembangkit listrik. Perusahaan ini mengelola Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) dengan kapasitas produksi listrik sebesar 3x500 MegaWatt, yang mana merupakan salah satu pembangkit listrik terbesar di Jawa Timur.

PT. Z mengelola 3 blok PLTGU, masing-masing blok terdiri dari tiga turbin gas, tiga *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG) dan tiga turbin uap, terlihat pada gambar 1.1. PLTGU merupakan jenis pembangkit dengan efisiensi tinggi, gas buang dari turbin gas dimanfaatkan untuk pemanasan air di HRSG. Uap hasil pemanasan digunakan untuk memutar turbin uap, dengan begitu turbin uap bergantung pada keandalan turbin gas. Berikut siklus pembangkit listrik tenaga gas dan uap:



Gambar 1. 1 Siklus pembangkit listrik tenaga gas dan uap

Peningkatan jumlah konsumen listrik setiap tahunnya diimbangi dengan pertumbuhan pembangkit listrik yang pesat. Dengan semakin banyaknya pesaing pembangkit listrik baru, PT. Z mengalami penurunan permintaan pelanggan, terlihat pada grafik *capacity factor* pada gambar 1.2. Dikarenakan terjadi penurunan permintaan pelanggan, pola operasi turbin gas mengalami perubahan. Pada tabel 1.1 dapat dilihat bahwa frekuensi *start-stop* khususnya turbin gas blok 2 sangat tinggi.



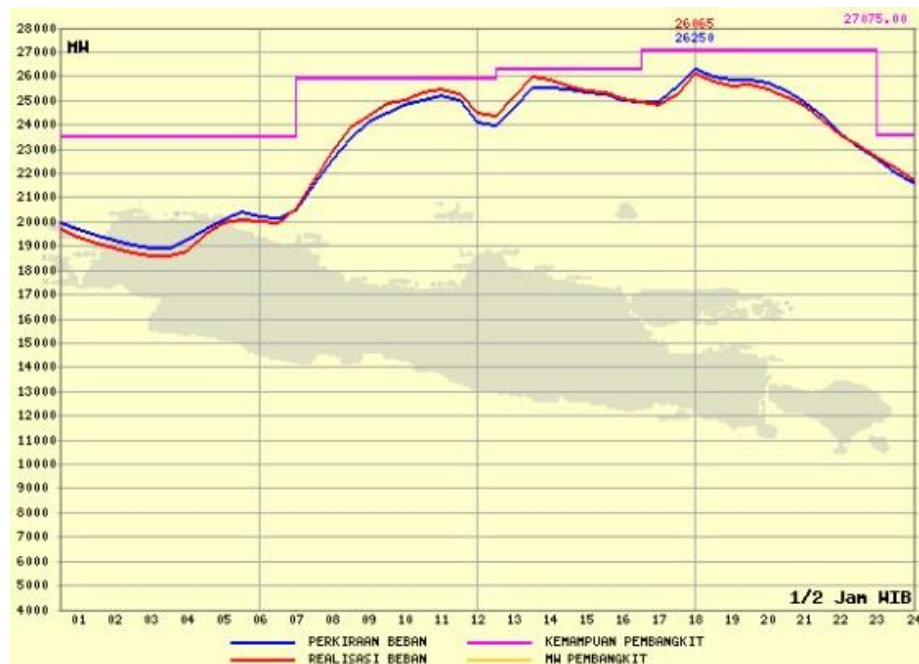
Gambar 1. 2 *Capacity factor*

Tabel 1. 1 Jumlah *start-stop* turbin gas

Unit	Frekuensi start-stop (kali)					Total
	2013	2014	2015	2016	2017	
GT 1.1	3	20	17	22	28	90
GT 1.2	29	31	23	28	15	126
GT 1.3	12	18	32	115	36	213
GT 2.1	115	64	122	141	50	492
GT 2.2	49	11	28	82	56	226
GT 2.3	93	130	128	91	92	534
GT 3.1	16	17	19	20	27	99
GT 3.2	11	16	17	7	21	72
GT 3.3	122	130	145	217	130	744

*GT : *Gas Turbine*

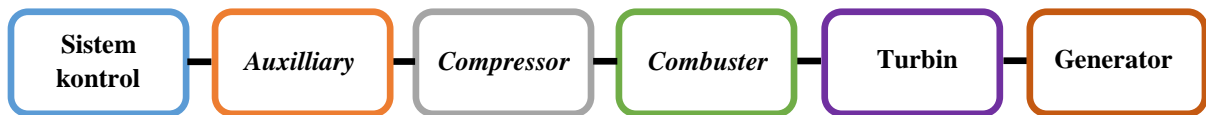
Meningkatnya frekuensi *start-stop* turbin gas dikarenakan kondisi kebutuhan sistem Jamali, yang mana diatur oleh Pusat Pengatur Beban (P2B). Pada gambar 1.3 menunjukkan grafik pemakaian listrik area Jawa Madura Bali (Jamali) pada tanggal 21 November 2018.



Gambar 1. 3 Grafik pemakaian listrik area Jawa Madura Bali (Jamali)

Pada gambar 1.3 terlihat pemakaian listrik pada jam 08:00WIB mulai mengalami kenaikan dan puncak pemakaian listrik pada jam 17:00 WIB sampai dengan 22:00 WIB (kondisi sistem Jamali tanggal 21 November 2018, sumber: Bidang Operasi Sistem P2B). Sedangkan diatas jam 22:00 WIB pemakaian listrik mulai mengalami penurunan. Dengan kondisi seperti itu P2B memerintahkan pembangkit listrik untuk menjalankan atau *start* turbin gas sebelum jam 08:00 WIB dan mematikan atau *stop* turbin gas selepas jam 22:00 WIB. Dengan pola operasi tersebut diatas (frekuensi *start-stop* tinggi), turbin gas sering mengalami permasalahan atau kegagalan fungsi peralatan saat proses *start up* (*fail on demand*). Saat proses *start up* apabila salah satu *sequence* peralatan tidak berjalan, maka mengakibatkan terjadinya *start failure*. Oleh karena itu keandalan dari masing-masing peralatan turbin gas harus dijaga.

Peralatan utama turbin gas terdiri dari: kompresor, ruang bakar, turbin, generator, sistem kontrol dan alat-alat bantu. Masing-masing sistem dan sub sistem turbin gas memegang perananan penting, yang mana sangat menentukan keandalan sistem turbin itu sendiri. Apabila salah satu bagian dari turbin gas yang tidak andal maka akan berpengaruh terhadap keandalan sistem. Pada gambar 1.4 dapat dilihat sistem dan sub sistem yang ada di tubin gas.



Gambar 1. 4 *Equipment* utama turbin gas

Masing-masing *equipment* turbin gas memiliki fungsi tersendiri dan berkontribusi terhadap keandalan sistem turbin gas. Fungsi dan komponen turbin gas sebagai berikut: sistem kontrol berfungsi sebagai pusat pengendali semua peralatan turbin gas, yang terdiri dari *computer processing unit* (CPU), *data acquisition system* (DAS) dan sensor. Alat-alat bantu turbin gas meliputi: sistem pelumas, sistem kontrol hidrolis, peralatan *starting* (*pony motor*, *starting motor* dan *torque converter*) dan sistem pendingin. Sedangkan *compressor* meliputi: *intake air filter* (IAF), *inlet guide vane* (IGV). Kemudian untuk ruang bakar (*combustion*) terdiri dari: *nozzle* bahan bakar gas (BBG), *nozzle* bahan bakar minyak (BBM), valve BBG dan BBM. Selanjutnya untuk turbin sendiri meliputi: *rotor cooling air* (RCA), *casing* dan *turbin blade*. Untuk peralatan *electrical* (generator) terdiri dari: sistem *exciter* dan *main transformer*. Semua sistem dan sub sistem diatas sangat menentukan keandalan turbin gas.

Selain terjadi perubahan pola operasi, peralatan pada turbin gas sudah mulai tua. Pada umumnya desain umur pembangkit listrik adalah 25 tahun, sedangkan turbin gas di PT. Z sudah beroperasi selama 26 tahun, sehingga banyak peralatan dari turbin gas yang sudah memasuki masa *aging*. Kegagalan pada sebagian besar operasi merupakan fungsi waktu (Slack, 2001). Setiap tahunnya banyak terjadi gangguan seperti pada tabel 1.2. Berikut data kerusakan turbin gas pada tahun 2017:

Tabel 1. 2 Frekuensi kerusakan peralatan turbin gas

Unit Turbin Gas	Jumlah kerusakan peralatan per tahun (kali)				
	2013	2014	2015	2016	2017
1	19	14	33	33	31
2	14	16	18	23	28
3	14	15	41	25	39

Dari data diatas terlihat bahwa peralatan turbin gas pada tahun 2017 banyak mengalami gangguan (*breakdown*). Dengan demikian pemeliharaan rutin yang telah dilaksanakan oleh PT. Z perlu dievaluasi. Pemeliharaan adalah semua tindakan yang

penting dengan tujuan untuk menghasilkan produk yang baik atau untuk mengembalikan keadaan yang memuaskan (Dhillon, 1997). Dengan menggunakan alokasi dan optimasi keandalan sistem, diperoleh penurunan laju biaya total pemeliharaan (Suhandoko; 2011, Suharjito; 2011, Hardiyanto; 2017, Wijaya; 2018). Sedangkan pada penelitian ini menggunakan metode *System Equipment Reliability Prioritization* (SERP) untuk menentukan peralatan kritis turbin gas dan dilakukan optimasi keandalan dengan melakukan penggantian beberapa *critical part* untuk menurunkan biaya pemeliharaan turbin gas.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah bagaimana menentukan interval waktu pemeliharaan pencegahan dari unit turbin gas di PT. Z untuk meningkatkan keandalannya yang telah mengalami perubahan pola operasi dan memasuki masa *aging* dengan mempertimbangkan biaya pemeliharaan.

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan permasalahan yang telah diuraikan, maka tujuan penelitian yang ingin dicapai antara lain:

- a. Mendapatkan nilai *top ten* dari *Maintenance Priority Index* (MPI) peralatan turbin gas dengan metode SERP.
- b. Memperoleh nilai keandalan masing-masing peralatan turbin gas.
- c. Memperoleh nilai optimasi keandalan dan biaya pemeliharaan pada masing-masing peralatan turbin gas.
- d. Mendapatkan interval waktu pemeliharaan pencegahan pada masing-masing peralatan turbin gas.

1.4 Batasan Penelitian

Agar permasalahan pada penelitian ini tidak terlalu melebar, maka ditentukan batasan masalah sebagai berikut:

- a. Analisis keandalan dilakukan pada turbin gas seri M701D blok 2.

- b. Analisis keandalan turbin gas pada level *equipment* (peralatan) turbin gas.
- c. Pengambilan data kerusakan peralatan turbin gas mulai tahun 2013 sampai dengan 2017.

1.5 Asumsi Penelitian

Asumsi yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Tidak terdapat kesalahan operator dalam mengoperasikan turbin gas.
- b. Tidak terdapat kesalahan input data *work order* (WO).
- c. Kemampuan teknisi pemeliharaan telah memenuhi standar, sehingga pada saat perbaikan peralatan yang rusak dapat kembali seperti semula.
- d. Penggantian part pada saat pemeliharaan memiliki spesifikasi yang sama.
- e. Peralatan yang tidak memiliki data *downtime*, diasumsikan memiliki nilai keandalan sama dengan satu.

1.6 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan masukan kepada manajemen PT. Z untuk menentukan interval waktu pemeliharaan pencegahan pada peralatan turbin gas dengan memenuhi persyaratan keandalan dan meminimalkan biaya pemeliharaan.

1.7 Sistematika Penulisan

BAB 1 PENDAHULUAN

Membahas latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, asumsi, tujuan, manfaat penelitian dan sistematika penulisan.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Membahas tinjauan pustaka dari berbagai referensi yang digunakan dalam penelitian ini.

BAB 3 METODE PENELITIAN

Membahas metode yang digunakan pada penelitian untuk mencapai tujuan dan manfaat penelitian dengan batasan dan perumusan masalah yang ditentukan.

BAB 4 PENGOLAHAN DATA

4.1 *System & Equipment Reliability Prioritization* (SERP)

Membahas analisa keandalan peralatan turbin gas dengan menggunakan metode SERP. Dengan menggunakan metode tersebut diperoleh nilai *Maintenance Priority Index* (MPI) peralatan turbin gas dan ditentukan peralatan turbin gas yang termasuk *top ten* peringkat MPI.

4.2 Analisa Keandalan Turbin Gas

Membahas analisa keandalan peralatan turbin gas dengan menggunakan *software Weibull++6*, dimana diperoleh nilai keandalan masing-masing peralatan turbin gas sebelum dilakukan optimasi keandalan.

BAB 5 OPTIMASI KEANDALAN

5.1 Penentuan Interval Pemeliharaan Optimal

Membahas mengenai alokasi keandalan optimal dengan target keandalan sistem sesuai kebijakan PT. Z. Dengan menggunakan *software Lingo* diperoleh aloaksi keandalan optimal. Setelah itu dilakukan analisa keandalan optimal dengan menggunakan *Weibull++6*, sehinggaa diperoleh interval pemeliharaan optimal masing-masing peralatan turbin gas.

5.2 Analisa Biaya Pemeliharaan

Membahas mengenai biaya pemeliharaan sebelum dan sesudah dilakukan optimasi keandalan, serta melakukan analisa hubungan optimasi keandalan dengan biaya pemeliharaan.

BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan dan saran berisi tentang resume dari hasil analisa penelitian dan saran untuk penelitian selanjutnya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Pembangkit Listrik

Sistem pembangkit listrik gas dan uap (PLTGU) adalah suatu sistem yang mengkombinasikan dua siklus termodinamika yang berbeda dalam sebuah sistem, yaitu siklus *Brayton* pada turbin gas dan siklus *Rankine* pada turbin uap. Kedua sistem ini diaplikasikan dengan tujuan untuk meningkatkan efisiensi, karena gas buang dari turbin gas masing-masing mengandung nilai kalor yang tinggi. Kalor yang tinggi inilah yang dimanfaatkan kembali di dalam ruangan penghasil uap atau *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG) untuk menggerakkan turbin uap.

PLTGU di PT. Z terdiri dari tiga blok, masing-masing terdiri dari tiga buah turbin gas (GT), tiga buah HRSG dan satu buah turbin uap. Untuk pengoperasian turbin gas blok I dan II dapat menggunakan bahan bakar gas dan bahan bakar minyak (HSD), sedangkan blok III hanya dapat menggunakan bahan bakar gas alam. Sisa panas dari GT dialirkan menuju HRSG untuk memanaskan air agar menghasilkan uap untuk memutar turbin uap.

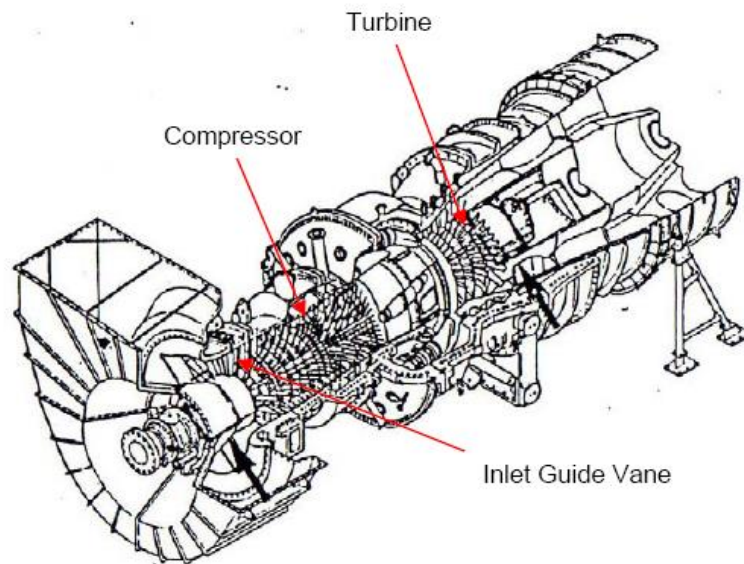
Pengoperasian PLTGU dapat dilakukan dengan beberapa macam kombinasi sesuai kebutuhan listrik jaringan, yaitu sebagai berikut:

- Operasi dengan siklus kombinasi penuh (3 turbin gas, 3 HRSG dan 1 turbin uap)
- Operasi dengan siklus kombinasi parsial (2 turbin gas, 2 HRSG dan 1 turbin uap)
- Operasi dengan siklus kombinasi parsial (1 turbin gas, 1 HRSG dan 1 turbin uap)
- Operasi siklus terbuka (gas buang langsung dialirkan ke udara bebas melalui *bypass stack*, tanpa melalui HRSG)
- Gabungan antara siklus kombinasi dan siklus terbuka

Turbin gas merupakan sistem yang pertamakali menerima tenaga dari hasil pembakaran bahan bakar. Pembakaran ini terjadi di dalam ruang bakar. Di dalam ruang bakar terjadi percampuran udara dengan bahan bakar serta terdapat penyalaan api yang mengakibatkan terjadinya pembakaran. Energi yang dihasilkan dari pembakaran digunakan untuk menggerakkan turbin gas. Secara umum sistem turbin gas terdiri dari tiga buah peralatan utama (gambar 2.1), yaitu:

- a. Kompresor
- b. Ruang bakar
- c. Turbin gas

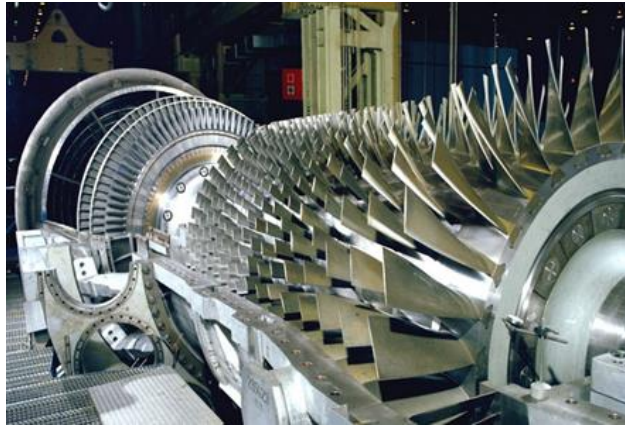
Berikut gambar sistem turbin gas dengan peralatan utamanya:



Gambar 2.1 Sistem turbin gas

- a. Kompresor

Kompresor pada turbin gas memiliki poros yang menyatu dengan poros turbin, berikut gambar sudu kompresor turbin gas:



Gambar 2. 2 Sudu kompresor

Berikut spesifikasi turbin gas dan kompresor seri M701D:

Turbin

Type : *Open cycle, single shaft, heavy duty*

Model : MW-701D

Kompresor

Type : *Axial flow*

No. of stage : 19

Kondisi udara sekitar yang masuk ke dalam kompresor mempengaruhi kinerja turbin gas. Kondisi yang mempengaruhi kualitas udara masuk ke kompresor adalah tekanan, temperatur dan tingkat kekotorannya. Tekanan udara berkaitan erat dengan lokasi ketinggian terhadap permukaan laut. Tekanan udara ini diukur dengan menggunakan barometer. Pada daerah yang lebih tinggi, tekanan udaranya rendah, sehingga kerapatan udara kecil dan massa jenis udara akan mengecil, demikian pula sebaliknya. Selain itu massa jenis udara juga dipengaruhi oleh temperatur lingkungan sekitar. Pada temperatur tinggi massa jenis udara kecil.

Udara yang masuk kedalam kompresor terlebih dahulu disaring melalui *Inlet Air Filter* (IAF). Jika udara sekitar semakin kotor maka filter ini akan semakin cepat kotor, sehingga mempercepat naiknya *differential pressure* pada IAF. Kompresor memiliki rugi-rugi yang disebabkan oleh kerugian bentuk sudu, kerugian karena gesekan antara udara dengan

permukaan sudu dan kerugian karena *clearance* sehingga menyebabkan kembalinya udara dari tingkat yang lebih tinggi ke tingkat sebelumnya.

Peristiwa yang sering terjadi pada kompresor yaitu adanya fenomena *stall* dan *surge*. Fenomena *stall* yaitu peristiwa terhentinya aliran udara secara tiba-tiba pada saat start karena tekanan udara pada tingkat lebih tinggi masih terlalu rendah sehingga pada daerah dengan tingkat tinggi yang memiliki laluan sempit akan terjadi peristiwa udara terhenti karena flow terlalu tinggi. *Surge* adalah peristiwa *stall* yang berlebihan sehingga dapat menyebabkan patahnya sudu. Untuk mengantisipasi pasi hal tersebut dilakukan pembuangan udara keluar melalui *bleed valve*.

Kompresor terdiri dari beberapa bagian:

1. *Inlet Air Filter* (IAF)

IAF berfungsi sebagai penyaring udara luar yang masuk menuju kompresor. IAF memiliki tiga tingkat lapisan, yang terdiri dari 1152 buah filter. Tingkat kekotoran udara pada IAF diukur dengan *differential pressure* (DP) dengan menggunakan *pressure indicator* (PI) dan manometer. Kondisi normal DP IAF sekitar 50 mmWC, tingkat kekotorannya tinggi apabila mencapai 100 mmWC.

2. *Inlet Guide Vane* (IGV)

Inlet guide vane merupakan valve pengatur yang terletak di depan kompresor dan berfungsi untuk mengatur masuknya udara menuju kompresor.

3. *Rotor Blade*

Rotor blade berfungsi sebagai *diffuser* untuk melakukan pemampatan (kompresi) udara. Blade ini tertinggi dari 19 tingkatan, dimana semakin tinggi tingkatan maka *blade* semakin pendek.

4. Sudu hantar

Sudu hantar merupakan peralatan kompresor yang berfungsi untuk mengarahkan aliran udara menuju *blade* berikutnya.

b. *Combustor* (ruang bakar)

Ruang bakar adalah ruangan tempat terjadinya pembakaran. Di dalamnya terdapat *combustor basket* berjumlah 12 dan *transition piece* untuk mengarahkan semburan gas bakar. Pada combustor basket nomer 2 dan 3 terdapat *igniter* dan pada nomer 11 dan 12 terdapat *flame detector*. Proses pembakaran yang baik harus dilakukan dengan menggunakan bahan bakar yang telah dikabutkan secara sempurna. Pengabutan dapat dilakukan dengan menggunakan *nozzle* bahan bakar. Proses terjadinya pembakaran yaitu dengan memberikan lompatan bunga api oleh *igniter* di daerah pengabutan bahan bakar.

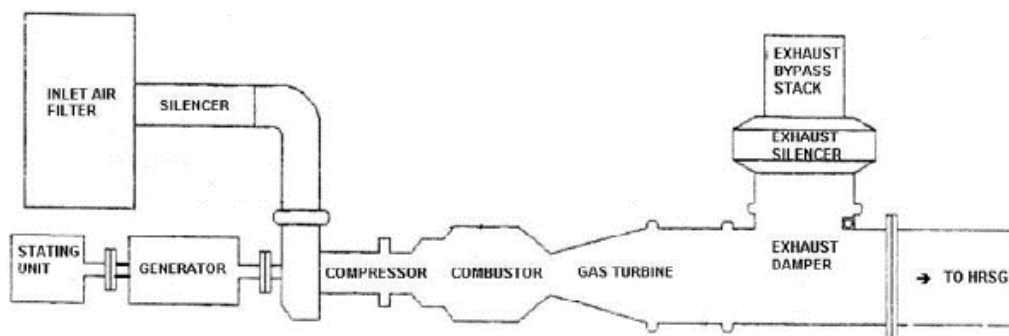
Berikut spesifikasi ruang bakar turbingas:

Type : Cannular Type

No. of Basket : 18

c. Turbin Gas

Sub sistem atau peralatan turbingas dapat dilihat pada gambar 2.2. Sistem pengoperasian awal atau *start up* turbin gas berlangsung dengan cepat, kurang lebih 25 – 30 menit. Berikut skema peralatan secara sederhana dari turbin gas:



Gambar 2. 3 Turbin gas

Berikut spesifikasi dari turbin gas seri M701D:

Type : Axial flow, reaction type

No. of stage : 4

Rate shaft speed : 3000 rpm

Direction of rotation : Clockwise viewed from output coupling (generator end)

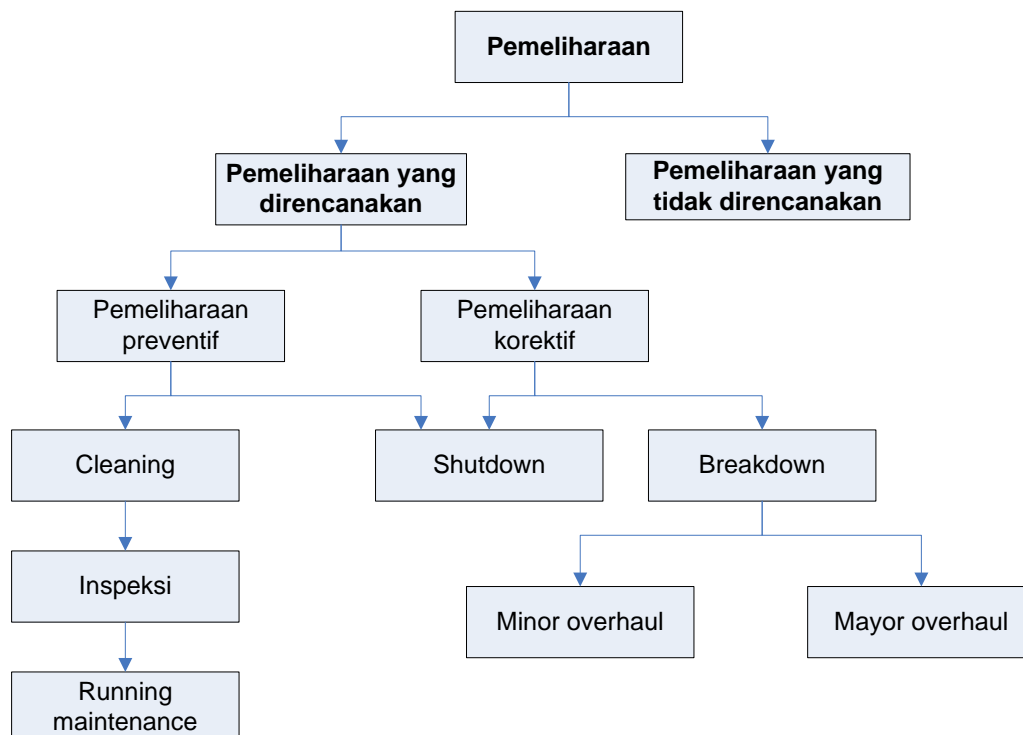
Overspeed trip setting : 3300 ± 30 rpm ($110\% \pm 1\%$)

Rotor weight : Approx. 55,4 tons.

2.2 Manajemen Pemeliharaan

Definisi pemeliharaan menurut O'Connor (2001) adalah suatu kegiatan untuk memelihara dan menjaga fasilitas yang ada serta memperbaiki, melakukan penggantian yang diperlukan untuk mendapatkan suatu kondisi operasi produksi agar sesuai dengan perencanaan yang ada.

Corder (1992) membagi kegiatan pemeliharaan menjadi dua bentuk seperti pada gambar 2.3, yaitu pemeliharaan terencana (*planned maintenance*) dan pemeliharaan tidak terencana (*unplanned maintenance*), dalam bentuk pemeliharaan darurat (*breakdown maintenance*). Pemeliharaan terencana merupakan kegiatan perawatan yang dilaksanakan berdasarkan perencanaan terlebih dahulu. Pemeliharaan terencana terdiri dari pemeliharaan pencegahan dan pemeliharaan korektif.



Gambar 2. 4 Jenis kegiatan pemeliharaan

a. Pemeliharaan pencegahan (*Preventive maintenance*)

Preventive maintenance adalah kegiatan pemeliharaan dan perawatan yang dilakukan untuk mencegah timbulnya kerusakan-kerusakan yang tidak terduga dan menentukan kondisi atau keadaan yang menyebabkan fasilitas produksi mengalami kerusakan pada waktu digunakan dalam proses produksi.

Preventive maintenance ini sangat efektif digunakan dalam menghadapi fasilitas produksi yang termasuk dalam critical unit. Sebuah peralatan tersebut akan membahayakan kesehatan atau keselamatan para pekerja, mempengaruhi kualitas produk yang dihasilkan, menyebabkan kemacetan pada seluruh produksi, dan modal yang ditanamkan dalam fasilitas tersebut cukup besar atau harganya mahal (Assauri, 2004).

Dalam prakteknya, *preventive maintenance* yang dilakukan oleh suatu pabrik dapat dibedakan menjadi *routine maintenance* dan *periodic maintenance*. *Routine maintenance* adalah kegiatan pemeliharaan dan perawatan yang dilakukan berdasarkan lamanya jam kerja mesin sebagai jadwal kegiatan, misalnya seratus jam sekali, dan seterusnya. Kegiatan *periodic maintenance* ini jauh lebih berat dari *routine maintenance* (Assauri, 2004).

b. Pemeliharaan Korektif (*corrective maintenance*)

Menurut Prawirosentono (2000), pemeliharaan korektif adalah pemeliharaan peralatan karena adanya hasil produk yang tidak sesuai dengan rencana. Kegiatan ini dimaksudkan agar peralatan tersebut dapat digunakan kembali dalam operasi, sehingga proses produksi dapat berjalan lancar kembali. Sedikit berbeda dengan pendapat sebelumnya, selain *preventive maintenance* dan *corrective maintenance*, (Patton, 1983) menambahkan satu jenis pemeliharaan lagi, yaitu pemeliharaan kemajuan (*improvement maintenance*), yang berfungsi untuk memodifikasi, mendesain ulang, dan merubah mesin ataupun pesanan.

Disamping pemeliharaan terencana (*planned maintenance*) yang telah dijelaskan sebelumnya, terdapat pula pemeliharaan tidak terencana (*unplanned maintenance*). Pemeliharaan tidak terencana didefinisikan sebagai pemeliharaan yang dilakukan karena adanya indikasi atau petunjuk bahwa adanya tahap kegiatan proses produksi yang tiba-tiba memberikan hasil yang tidak layak. Pelaksanaan pemeliharaan tak terencana ini dapat berupa pemeliharaan darurat

(*emergency maintenance*) yaitu kegiatan perawatan mesin yang memerlukan penanggulangan yang bersifat darurat agar tidak menimbulkan kerusakan lebih parah. (Prawirosentono, 2000).

2.3 System & Equipment Reliability Prioritization (SERP)

Failure defense planning (FDP) adalah sebuah pendekatan teknik untuk mencapai keandalan operasional yang maksimum di dalam penempatan perencanaan pemeliharaan. Pengembangan FDP merupakan hal yang penting dalam sebuah system dan peralatan kerja untuk keseluruhan proses berdasarkan biaya, keamanan produksi, perhatian terhadap lingkungan, kualitas produk dan perhatian bisnis lainnya.

Level pertama dari FDP dilakukan melalui *System Equipment Reliability Prioritization* (SERP), yang telah memiliki tujuan spesifik sebagai berikut:

- a. *Identification dan Ranking of System*: station pertama dibagi menjadi sistem-sistem fungsional. Sistem didefinisikan secara luas sebagai suatu kumpulan peralatan yang bekerjasama untuk memberikan suatu fungsi spesifik yang mendukung operasi station. *System criticality* disusun berdasarkan beberapa aspek operasi dan peringkat-peringkat ini digabung untuk memberikan suatu *system criticality ranking* (SCR).
- b. *Identification dan Ranking of Assets (Operational Criticality)*: Peralatan diidentifikasi dan dihubungkan parent system. Tiap-tiap bagian peralatan yang diidentifikasi diberikan *operational criticality ranking* (OCR) berdasarkan pada *criticality*-nya terhadap *operation* dari *parent* sistem gabungan. OCR ini digabungkan dengan SCR untuk membentuk suatu *asset criticality ranking* (ACR).
- c. *Ranking of Equipment (Kemungkinan Kegagalan)*: Peralatan dievaluasi berdasarkan kemungkinan akan kegagalan atau operasi yang tidak *reliable*. *Asset Failure Probability Factor* (AFPF) ini digabungkan dengan ACR untuk membentuk *Maintenance Priority Index* (MPI). *Rating MPI* ditujukan untuk menggambarkan kepentingan relative dan level permintaan yang ditempatkan pada peralatan oleh maintenance organization jika peralatan ini bekerja dengan baik.

SERP merupakan suatu metode untuk merangking tingkat keandalan peralatan dengan mempertimbangkan dampak dan kemungkinan kegagalan, untuk menentukan prioritas analisa kebutuhan pemeliharaan. Banyak perusahaan pembangkit listrik yang menggunakan SERP, dikarenakan jumlah sistem peralatan banyak, dampak kerusakan terhadap operasi dan kerusakan lanjut berbeda, keandalan masing-masing sistem peralatan berbeda dan sumber daya terbatas.

Output dari SERP adalah *maintenance prioritization index* (MPI), dimana MPI adalah perangkingan *equipment* yang memiliki nilai antara 1-1000 yang digunakan untuk prioritisasi pemeliharaan yang terdiri dari *system criticality ranking* (SCR), *operational criticality ranking* (OCR) dan *asset failure probability factor* (AFPF).

$$MPI = \text{Consequence} \times \text{Consequence} \times \text{Probability} \quad (2.1)$$

$$MPI = SCR \times OCR \times AFPF$$

Berikut tahapan-tahapan atau langkah untuk menentukan SERP:

1. Menentukan sistem dasar dalam suatu unit, dimana sistem adalah kumpulan peralatan/ equipment
2. *System criticality ranking* (SCR)

Setiap sistem atau peralatan diukur berdasarkan tujuh aspek (fungsi dan nilai), dapat dilihat pada tabel 2.1 sampai dengan tabel 2.7; yang berbeda terhadap unit atau entitasnya, hasilnya dikombinasikan untuk menghitung SCR.

$$SCR = \sqrt{(OC^2 + PT^2 + PQ^2 + SF^2 + RC^2 + PE^2 + RT^2)/7} \quad (2.2)$$

Dimana:

Operational cost (OC) : biaya pemeliharaan rata-rata

Process throughput/ availability (PT) : dampak kegagalan atau penurunan kemampuan produksi

Product quality (PQ) : kualitas produksi

Safety (SF) : dampak risiko keselamatan kerja dan jumlah pekerja yang mempengaruhinya.

Regulatory compliance (RC) : pemenuhan kebijakan lingkungan hidup

Plant efficiency (PE) : efisiensi *plant*

Regulatory time (RT) : didefinisikan sebagai lama waktu pemulihan jika terjadi kegagalan pada peralatan tersebut.

Tabel 2. 1 Kriteria *Operational Cost* (OC)

Kriteria <i>Operational Cost</i> (OC)	
10	> Rp. 10 M untuk penggantian peralatan utama
	> Rp. 500 juta untuk penggantian / <i>repair spare parts</i>
8	= Rp. 5 - 10 M untuk penggantian peralatan utama
	= Rp. 100 – 500 juta untuk penggantian / <i>repair spare parts</i>
6	= Rp. 1 - 5 M untuk penggantian peralatan utama
	= Rp. 50 – 100 juta untuk penggantian / <i>repair spare parts</i>
4	= Rp. 500 juta - 1 M untuk penggantian peralatan utama
	= Rp. 10 – 50 juta untuk penggantian / <i>repair spare parts</i>
2	< Rp. 500 juta untuk penggantian peralatan utama
	= Rp. 10 juta untuk penggantian / <i>repair spare parts</i>

Tabel 2. 2 Kriteria *Process Throughput/ Availability* (PT)

Kriteria <i>Process Throughput / Availability</i> (PT)	
10	Satu block atau entitas pembangkit <i>shutdown</i> atau <i>trip</i>
8	Unit <i>shutdown</i> atau <i>trip</i>
6	Unit <i>derating</i> > 50% dan berpotensi <i>trip</i>
4	Unit <i>derating</i> < 50% dan berpotensi <i>trip</i>
2	Tidak berdampak langsung pada produksi listrik

Tabel 2. 3 Kriteria *Product Quality* (PQ)

Kriteria <i>Product Quality</i> (PQ)	
10	Kemampuan <i>ramp rate</i> turun sampai dengan 75 %
8	Kemampuan <i>ramp rate</i> turun sampai dengan 50 %
6	Kemampuan <i>ramp rate</i> turun sampai dengan 25 %
4	Kemampuan <i>ramp rate</i> turun sampai dengan < 25 %
2	Tidak berdampak langsung pada produksi listrik

Tabel 2. 4 Kriteria *Safety Factor* (SF)

Kriteria <i>Safety Factor</i> (SF)				
10	<i>Dangerous Situation</i>	H	<i>& Personnel Injury</i>	H
8	<i>Dangerous Situation</i>	L	<i>& Personnel Injury</i>	H
6	<i>Dangerous Situation</i>	H	<i>& Personnel Injury</i>	L
4	<i>Dangerous Situation</i>	L	<i>& Personnel Injury</i>	L
2	Tidak berdampak			

Tabel 2. 5 Kriteria *Regulatory/ Enviromental Compliance* (RC)

Kriteria <i>Regulatory / Environmental Compliance</i> (RC)	
10	Kerusakan sistem berakibat denda / pidana / shutdown yang ditentukan oleh lembaga lingkungan (Bappedal Pusat dan Bappedalda)
8	Kerusakan sistem berakibat laporan insiden kepada lembaga lingkungan (Bappedal Pusat & Bappedalda), ada keluhan masyarakat sekitar
6	Kerusakan sistem berakibat laporan insiden tersebut dalam perusahaan (ISO 14000)
4	Kerusakan sistem mengakibatkan kebutuhan pembersihan pada sistem dengan segera sesuai dengan kebijakan lingkungan perusahaan (ISO 14000)
2	Kerusakan sistem tidak berdampak pada lingkungan

Tabel 2. 6 Kriteria *Plant Efficiency* (PE)

Kriteria <i>Plant Efficiency</i> (PE)	
10	Kegagalan sistem berdampak besar terhadap penurunan efisiensi
5	Kegagalan sistem berdampak sedang terhadap penurunan efisiensi
1	Kegagalan sistem tidak berdampak terhadap penurunan efisiensi

Tabel 2. 7 Kriteria *Recovery Time* (RT)

Kriteria <i>Recovery Time</i> (RT)	
10	Waktu pemulihan > 6 bulan
8	Waktu pemulihan 2-6 bulan
6	Waktu pemulihan 1-2 bulan
4	Waktu pemulihan 1-4 minggu
2	Waktu pemulihan < 1 minggu

3. *Operational criticality ranking* (OCR)

Peralatan yang berada pada setiap sistem diperingkatkan berdasarkan kekritisannya terhadap fungsi sistem induk. Untuk penilaian dari setiap peralatan menggunakan dua parameter sebagai berikut:

- a. Berdasarkan berapa lama waktu kegagalan peralatan yang mempengaruhi kegagalan fungsional sistem
- b. Ketersediaan untuk mem-back up atau redundansi peralatan tersebut

4. *Asset Criticality Ranking (ACR)*

Asset criticality ranking ditentukan dari nilai SCR dengan *operational criticality ranking (OCR)*.

Tabel 2. 8 Kriteria *Operational Criticality Ranking (OCR)*

<i>Operational Criticality Ranking (OCR)</i>	
10	<i>No back-up</i>
8	<i>50 % redundancy</i>
6	<i>100% redundancy</i>
4	<i>Greater than 100% redundancy</i>
2	<i>Small or no effect on parent system functionality</i>
or	
10	<i>Immediate parent system functional failure</i>
8	<i>Parent system functional failure within 1 hour</i>
6	<i>Parent system functional failure within 1 shift</i>
4	<i>Parent system functional slow down</i>
2	<i>Small or no effect on parent system functionality</i>

Suatu peringkat tertentu pada *equipment* yang menunjukkan tingkat kekritisan terhadap fungsi individu dan operasionalnya yang merupakan kombinasi OCR dengan SCR.

$$ACR = SCR \times OCR \quad (2.3)$$

5. *Asset failure probability factor (AFPF)*

Keandalan *equipment* perlu ditinjau secara luas, berdasarkan catatan dari *equipment*, keahlian personelnnya dan diskusi dengan bagian operasi, pemeliharaan, engineering. Keandalan tersebut kemudian ditentukan pada skala numeric yang memperhitungkan batasan dari hal yang sangat andal sampai dengan sangat tidak andal.

Tabel 2. 9 *Asset Failure Probability Factor (AFPF)*

Asset Failure Probability Factor (AFPF)	
10	<i>Completely Unreliable</i> – Benar-benar tidak andal
	Kegagalan aset terjadi beberapa kali dalam satu bulan
8	<i>Very Unreliable</i> – Sangat tidak andal
	Kegagalan aset terjadi beberapa kali dalam satu tahun
6	<i>Unreliable</i> – Tidak andal
	Kegagalan aset terjadi setidaknya sekali dalam setahun
4	<i>Basically Reliable</i> – Andal
	Kegagalan aset jarang terjadi atau terjadi sekali dalam beberapa tahun
2	<i>Completely Reliable</i> – Sangat andal
	Kegagalan aset tidak pernah terjadi

2.4 Keandalan

Keandalan didefinisikan sebagai probabilitas suatu peralatan dapat melaksanakan fungsinya dengan normal tanpa terjadi kegagalan dalam periode waktu tertentu (Lewis, 1987). Definisi keandalan adalah probabilitas suatu sistem akan berfungsi secara normal ketika digunakan untuk periode waktu yang diinginkan dalam kondisi operasi spesifik (Dhillon, 1997). Fungsi yang dimaksud dapat merupakan fungsi atau gabungan dari berbagai macam fungsi yang diperlukan dalam suatu sistem. Untuk menghitung keandalan suatu peralatan biasanya dipakai suatu fungsi keandalan. Fungsi keandalan terhadap waktu dapat diformulasikan sebagai berikut (Lewis, 1987):

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (2.4)$$

Dimana :

$R(t)$ = keandalan (*reliability*)

$F(t)$ = probabilitas kegagalan

$f(t)$ = fungsi padat peluang

Analisis keandalan, baik untuk proses, sistem ataupun peralatan menurut David (2011) secara umum dapat didekati dengan dua metode analisis yakni analisis kuantitatif dan analisis kualitatif. Analisis kuantitatif dibedakan menjadi dua bagian, yaitu menggunakan metode simulasi dan metode analisis *statistic*

seperti *Weibull analysis*. Dalam analisis kualitatif dapat dilakukan dengan beberapa cara, salah satunya dengan menggunakan metode *failure mode effect analysis* (FMEA).

2.5 Mean Time Between Failure (MTBF)

Mean Time Between Failure adalah istilah dalam perhitungan *reliability* yang artinya waktu peralatan atau aset atau peralatan yang dihitung mulai peralatan tersebut dioperasikan sampai dengan terjadinya kerusakan (*failure*) pada peralatan itu semakin tinggi MTBF-nya maka peralatan cenderung *reliable*. MTBF merupakan kebalikan dari laju kegagalan yang menunjukkan selang waktu rata-rata terjadinya sebuah kegagalan. Perlu diperhatikan bahwa MTBF ini bukan menunjukkan suatu periode tanpa kegagalan sama sekali. MTBF ini merupakan nilai rata-rata selang waktu operasi antar kegagalan. Dengan kata lain, selang waktu antar kegagalan bisa lebih kecil dan lebih besar dari nilai MTBF ini. Untuk menghitung MTBF bisa digunakan rumus sebagai berikut (Lewis, 1987):

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (2.5)$$

2.6 Mean Time to Repair (MTTR)

Mean Time to Repair adalah istilah dalam perhitungan *reliability* yang artinya waktu yang diperlukan untuk memperbaiki peralatan atau aset sehingga peralatan itu menjadi normal kembali. Untuk menghitung MTTR bisa digunakan rumus sebagai berikut (Lewis, 1987):

$$MTTR = \int_0^{\infty} t \cdot m(t) dt \quad (2.6)$$

Dimana :

$$m(t) = \text{PDF times to repair}$$

2.7 Laju Kegagalan (*Failure Rate*)

Laju kegagalan adalah jumlah kegagalan dalam suatu selang waktu. Laju kegagalan (λ) adalah nilai laju kegagalan yang dapat dinyatakan sebagai perbandingan waktu kegagalan yang terjadi dengan waktu total saat operasi dari suatu peralatan (Lewis, 1987). Nilai laju kegagalan untuk sebuah sistem yang

memiliki laju kegagalan konstan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan di bawah ini (Lewis, 1987):

$$\lambda = \frac{f}{T} = \frac{1}{MTBF} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.7)$$

Dimana :

f = banyaknya kegagalan selama jangka waktu operasi

T = total waktu operasi

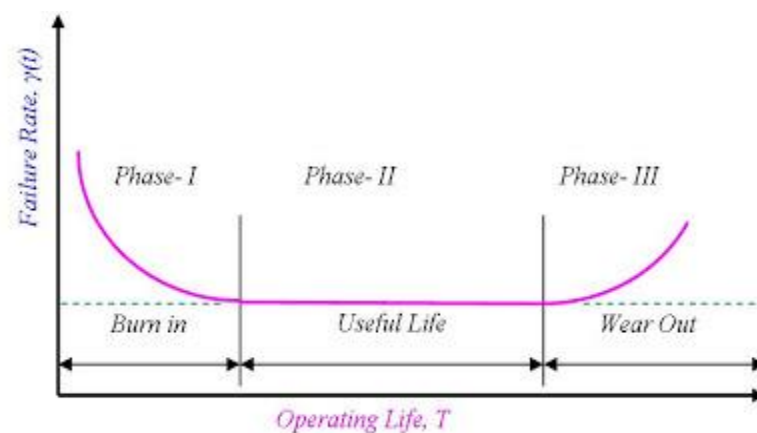
λ = Laju kegagalan

$MTBF$ = *Mean Time Between Failure*

2.8 Karakteristik Kegagalan

Kurva laju kegagalan menunjukkan karakteristik laju kegagalan suatu peralatan sebagai fungsi waktu. Pada kurva laju kegagalan (gambar 2.4), dikenal tiga periode waktu kegagalan yang meliputi periode kegagalan dini (*early failure*), kegagalan normal (*useful life*) dan kegagalan lanjut (*wear out*).

Periode kegagalan dini ditandai dengan laju kegagalan yang tinggi yang merupakan akibat kesalahan manufacturing atau pada proses pengendalian kualitas. Periode normal menunjukkan laju kegagalan rendah dan konstan selama suatu periode tertentu. Periode lanjut adalah periode dimana laju kegagalan suatu produk kembali lagi menunjukkan laju yang tinggi akibat keausan dan kerusakan peralatan karena pemakaian.



Gambar 2. 5 Kurva laju kegagalan

2.8.1 *Burn-in Zone (Early Life)*

Daerah ini adalah periode dimana sebuah sistem berada pada fase perancangan (*design*) hingga permulaan beroperasinya suatu peralatan atau sistem yang masih baru. Pada kurva ditunjukkan bahwa laju kerusakan yang awalnya tinggi kemudian menurun dengan bertambahnya waktu, atau diistilahkan sebagai *decreasing failure rate* (DFR). Kerusakan yang terjadi umumnya disebabkan karena proses manufacturing atau fabrikasi yang kurang sempurna.

2.8.2 *Useful Life Time Zone*

Periode ini mempunyai laju kerusakan yang paling rendah dan hampir konstan, yang oleh sebab itu disebut *constant failure rate* (CFR). Kerusakan yang terjadi bersifat random dan dipengaruhi oleh kondisi lingkungan. Ini adalah periode dimana sebagian besar umur berada pada masa pakai peralatan atau sistem itu. Dalam analisa, tingkat keandalan sistem yang berada pada periode *useful life time*, akan diasumsikan memiliki *failure rate* konstan terhadap waktu. Asumsi ini digunakan karena pada periode *early life time*, tidak dapat ditentukan apakah sistem tersebut sudah bekerja sesuai dengan standar yang ditentukan atau belum sedangkan pada periode *wear out time*, tidak dapat diprediksi kapan akan terjadi *failure*.

2.8.3 *Wear Out Zone*

Periode ini adalah periode akhir masa pakai peralatan atau sistem. Pada periode ini, laju kerusakannya naik dengan cepat dengan bertambahnya waktu, yang disebut dengan istilah *increasing failure rate* (IFR). Periode ini berakhir saat reliability peralatan atau sistem ini mendekati nol, dimana kerusakan yang terjadi sudah sangat parah dan tidak dapat diperbaiki kembali.

2.9 Distribusi Kegagalan

Pada saat pengolahan data, langkah pertama yang dilakukan adalah menentukan tipe distribusi yang tepat untuk data tersebut. Distribusi tersebut akan menentukan perhitungan keandalan yang nilainya berbeda beda untuk setiap jenis distribusi.

2.9.1 Distribusi Normal

Distribusi normal mempunyai 2 parameter yaitu rata – rata (μ) dan standar deviasi (σ). Fungsi padat peluangnya (*probability density function*) adalah:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t-\mu}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (2.8)$$

Dimana :

σ = Deviasi Standar

μ = Rata – rata

- Fungsi keandalan *distribusi normal* adalah :

$$R(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t-\mu}{\sigma} \right)^2 \right] dt \quad (2.9)$$

- Laju Kegagalan distribusi normal adalah :

$$\lambda(t) = \frac{\exp \left[-\left(\frac{t-\mu}{2\sigma} \right)^2 \right]}{\int_t^{\infty} \exp \left[-\left(\frac{t-\mu}{2\sigma} \right)^2 \right] dt} \quad (2.10)$$

- MTBF dari distribusi normal adalah :

$$MTBF = \mu \quad (2.11)$$

2.9.2 Distribusi Weibull

Jika distribusi kerusakan suatu sistem, sub sistem atau peralatan mengikuti distribusi *Weibull*, maka padat peluangnya adalah:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left[\frac{t-\gamma}{\eta} \right]^{\beta-1} \exp \left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta} \right] \quad (2.12)$$

Dimana :

β = Parameter Bentuk (*Shape Parameter*), $\beta > 0$

η = Parameter Skala (*Scale Parameter*), $\eta > 0$

γ = Parameter Lokasi

- Fungsi Keandalan Distribusi *Weibull* :

$$R(t) = \exp \left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta} \right] \quad (2.13)$$

- Laju Kegagalan Distribusi *Weibull* :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left[\frac{t-\gamma}{\eta} \right]^{\beta-1} \quad (2.14)$$

- MTBF untuk Distribusi *Weibull* Adalah :

$$MTBF = \gamma + \eta \Gamma (1/\beta + 1) \quad (2.15)$$

2.9.3 Distribusi *Lognormal*

Distribusi *Lognormal* memiliki 2 parameter yang hampir sama dengan distribusi normal yaitu rata – rata (t_0) dan variasinya (s). Fungsi padat peluangnya adalah :

$$f(t) = \frac{1}{t \cdot s \sqrt{2\pi}} \exp \left[- \frac{1}{2s^2} (\ln t - t_0)^2 \right] \quad (2.16)$$

Dimana :

t_0 = Rata – rata

s = Variansi

- Fungsi Keandalan dari distribusi *lognormal* adalah:

$$R(t) = 1 - \Phi \left[\frac{1}{s} \ln \frac{t}{t_0} \right] \quad (2.17)$$

- MTBF dari distribusi *lognormal* adalah:

$$MTBF = \exp [t_0 + (0,5 \times s^2)] \quad (2.18)$$

2.9.4 Distribusi *Eksponensial*

Jika distribusi kerusakannya mengikuti distribusi *eksponensial*, maka fungsi padat peluangnya adalah:

$$f(t) = \lambda \exp [-\lambda t] \quad t > 0, \lambda > 0 \quad (2.19)$$

- Fungsi keandalan distribusi *eksponensial* adalah:

$$R(t) = \exp [-\lambda t] \quad t \geq 0 \quad (2.20)$$

- Laju Kegagalan distribusi *eksponensial* adalah:

$$\lambda \quad (2.21)$$

- Sedangkan MTBF nya adalah:

$$MTBF = 1/\lambda \quad (2.22)$$

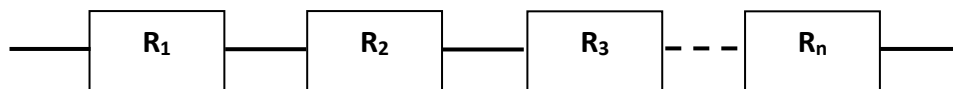
2.9.5 *Reliability System*

Untuk mengevaluasi keandalan dari suatu peralatan atau sistem yang pertama kali harus dilakukan adalah dengan memodelkan peralatan atau sistem

tersebut kedalam diagram blok keandalan (*reliability block diagram*). Dari diagram blok keandalan ini kemudian dihitung keandalan dari peralatan atau sistem yang bersangkutan. Hal ini sangat mungkin dilakukan untuk sistem yang sederhana. Ada beberapa *reliability system* yang dapat digunakan dalam menganalisa keandalan suatu sistem, yaitu sistem seri dan sistem paralel.

a. Sistem Seri

Suatu sistem dapat dimodelkan dengan susunan seri jika komponen-peralatan yang ada didalam sistem itu harus bekerja atau berfungsi seluruhnya agar sistem tersebut sukses dalam menjalankan misinya (gambar 2.6). Atau dengan kata lain bila ada satu peralatan saja yang tidak bekerja, maka akan mengakibatkan sistem itu gagal menjalankan fungsinya. Apabila suatu sistem terdiri dari beberapa peralatan yang disusun seri, maka keandalan dari sistem tersebut merupakan hasil perkalian masing-masing komponen penyusunnya.



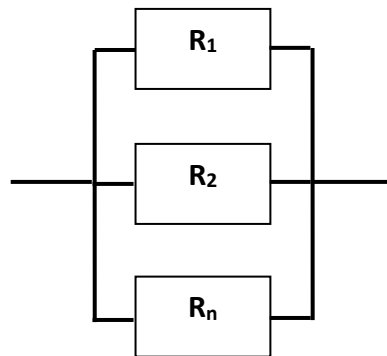
Gambar 2. 6 Sistem seri

Dari gambar diatas jika keandalan masing – masing komponen adalah R₁, R₂, R₃ ... R_n maka keandalan dari sistem tersebut adalah:

$$R_s = R_1 \times R_2 \times R_3 \times \dots R_n = \prod_1^n R_n \quad (2.23)$$

b. Sistem Paralel

Suatu sistem dapat dimodelkan dengan susunan paralel jika salah satu komponen gagal bekerja maka sistem masih bisa berjalan (gambar 2.7). Jika seluruh komponen-komponen yang ada didalam sistem itu gagal berfungsi maka akan mengakibatkan sistem itu gagal menjalankan fungsinya. Sistem ini biasanya berfungsi sebagai *redundency* yaitu menggunakan lebih dari satu komponen untuk meningkatkan keandalan. Sistem dapat berfungsi dengan baik selama tidak semua komponen dari sistem gagal berfungsi; dengan kata lain, sistem berfungsi dengan baik selama satu atau lebih dari komponen penyusun berfungsi dengan memuaskan.



Gambar 2. 7 Sistem Paralel

Dari gambar diatas jika keandalan masing – masing komponen adalah R_1 , R_2 , ... R_n maka keandalan dari sistem tersebut adalah :

$$R_p = 1 - (1 - R_1)(1 - R_2) \dots (1 - R_n) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (2.24)$$

2.10 Pengujian Distribusi

Pada saat pengujian distribusi statistik, dilakukan *curve fitting* antara data dan model distribusi untuk memperkirakan parameter keandalan dari data kegagalan. Hal ini dilakukan dengan menggunakan metode regresi *least square*, baik *linear* maupun *non linear* (Dodson, 2002). Kesesuaian pemilihan distribusi statistik data antar waktu kegagalan ditentukan oleh tiga parameter pengujian, yaitu *average goodness of fit*, *average of plot* dan *likelihood function ratio*.

2.10.1 Average Goodness of Fit (AvGOF)

AvGOF merupakan parameter uji yang memberikan nilai terhadap data waktu antar kegagalan berdasarkan *normalized index* dari *goodness of fit* (kesesuaian). Menurut Ebeling (1997), *uji goodness of fit* (kesesuaian) antara frekuensi hasil pengamatan dengan frekuensi yang diharapkan dapat digunakan untuk menganalisis kesesuaian data. Selain cara ini, terdapat pula alternatif lain yaitu uji *Kolgomorov-Smirnov* (KS), yang beranggapan bahwa distribusi variabel yang sedang diuji bersifat kontinu dan sampel diambil dari populasi sederhana. Dari uji *Kolgomorov-Smirnov* didapatkan nilai AvGOF dengan cara membandingkan distribusi empiris data dengan distribusi teoritis tertentu yang dihipotesiskan. Pada prinsipnya nilai KS yang semakin besar mengindikasikan ketidaksesuaian hasil uji distribusi.

2.10.2 *Average of Plot* (AvPlot)

Parameter uji AvPlot menunjukkan ukuran yang digunakan untuk mengplot nilai hasil uji distribusi. AvPlot memberikan nilai terhadap data waktu antar kegagalan. Nilai AvPlot didasarkan pada *normalized index* dari uji *plot fit*. Semakin kecil nilai AvPlot, akan semakin tepat distribusi yang diuji (Buwana, 2006).

2.10.3 *Likelihood Fuction Ratio* (LKV)

Parameter uji yang memberikan nilai terhadap data waktu antar kegagalan berdasarkan atas perhitungan parameter distribusi data antar kegagalan disebut sebagai *likelihood function ratio* (LKV). Hal ini dilakukan dengan menggunakan pengujian hipotesis yang membandingkan *goodness of fit* dari dua model untuk menentukan salah satu dari model tersebut yang lebih sesuai dengan sampel data yang dimiliki. LKV bersifat fleksibel dan dapat mengakomodasi satu atau beberapa perkiraan (Enders, 2010).

Setelah melakukan pengujian terhadap model distribusi dengan ketiga metode pengujian tersebut, selanjutnya dilakukan pembobotan terhadap masing-masing parameter pengujian. Untuk menetapkan besaran bobot pada setiap parameter tersebut digunakan nilai baku yang telah ditetapkan pada perangkat lunak *Weibull++6*.

2.11 **Penetapan Keandalan Optimal**

Apabila keandalan sistem aktual tidak tercapai dari target yang telah ditetapkan, maka perlu dilakukan upaya untuk meningkatkan keandalan tersebut. Keandalan sistem ditentukan oleh keandalan dari masing-masing komponen atau sub sistem tersebut (Mettas, 2000). Untuk mengalokasikan keandalan pada sub sistem, dapat digunakan *non linier programming* dan formulasi biaya.

Bila suatu sistem terdiri atas n komponen dan nilai keandalan yang ingin dicapai adalah R_G , maka permasalahan yang muncul adalah bagaimana mengalokasikan keandalan untuk semua atau beberapa subsistem penyusun sistem tersebut, sehingga dapat dicapai nilai keandalan sistem yang telah ditetapkan dengan biaya minimal.

$$P: \min C = \sum_{i=1}^n c_i (R_i) \quad (2.25)$$

Batasan: $R_s \geq R_G$ dan $R_{i, \min} < R_i < R_{i, \max}$

Dimana:

C = Total biaya sistem

$c_i (R_i)$ = Biaya subsistem

R_i = Keandalan subsistem i

n = Jumlah subsistem yang dipertimbangkan dalam optimasi

$R_{i, \min}$ = Keandalan minimum dari komponen atau subsistem

$R_{i, \max}$ = Keandalan maksimum dari komponen atau subsistem i

R_s = Keandalan sistem

R_G = Keandalan sistem yang ingin dicapai

Dari persamaan diatas terlihat bahwa biaya komponen atau subsistem adalah sangat menentukan nilai optimasi. Sedangkan kondisi lapangan data mengenai komponen sulit ditelusuri. Pada beberapa kasus jika data mengenai biaya sulit didapatkan maka dengan memandang sifat-sifat dari fungsi biaya dapat diformulasikan hubungan antara biaya dengan fungsi keandalan sebagai berikut (Mettas, 2000):

$$c_i(R_i, f_i, R_{i, \min}, R_{i, \max}) = \text{Exp} \left[(1 - f_i) \frac{R_i - R_{i, \min}}{R_{i, \max} - R_i} \right] \quad (2.26)$$

Pada persamaan diatas terdiri dari tiga variabel yang bersifat eksponensial, sebagai berikut:

1. Variabel (f_i) adalah *feasibility index* untuk konstanta peningkatan keandalan sistem relative terhadap sistem lain dalam suatu sistem yang dioptimasi. *Feasibility Index* menunjukkan tingkat kesulitan peningkatan keandalan system, diasumsikan dengan nilai berkisar 0-1. Nilai *index* tersebut tergantung pada kompleksitas desain, kondisi operasi, tingkat kekritisn, ketersediaan suku cadang, kelancaran pemeliharaan, dan lain lain. Dengan kata lain semakin sulit suatu sistem untuk ditingkatkan keandalannya, maka biaya yang dibutuhkan semakin besar. Sesuai dengan persamaan diatas, terlihat bahwa semakin kecil *index feasibility* semakin cepat diperoleh biaya yang tak terhingga. Beberapa metode dapat digunakan untuk menentukan *feasibility index* ini seperti factor

pembobotan untuk pengalokasian keandalan. Pembobotan ini tergantung dari beberapa faktor seperti kompleksitas komponen, kekritisan komponen, dan operasional profil komponen. Untuk menentukan *feasibility index* bisa juga digunakan keputusan engineer yang berdasarkan pengalaman terdahulu, kualitas supplier, *supplier availability* dan lain lain (Mettas, 2000).

2. Variabel ($R_{i,min}$) adalah nilai keandalan awal atau nilai keandalan sistem sekarang. Nilai keandalan dari system ke-i untuk waktu operasi tertentu didapatkan dari fungsi keandalan yang sesuai dengan distribusi dari kegagalan komponen atau subsistem yang bersangkutan
3. Variabel ($R_{i,max}$) adalah nilai keandalan maksimum yang mungkin dicapai sistem. Nilai keandalan maksimum yang mungkin dicapai adalah 1–100 %. Jika nilai keandalan maksimum yang mungkin dicapai suatu sistem semakin kecil maka biaya peningkatan keandalan sistem semakin cepat mencapai nilai terhingga.

Model fungsi biaya pada persamaan (2.26) ditentukan berdasarkan hasil pengamatan terhadap biaya peningkatan keandalan komponen seperti:

- Peningkatan biaya sebagai fungsi alokasi keandalan berawal dari keandalan minimal $R_{i,min}$ atau nilai keandalan sekarang sampai keandalan maksimal $R_{i,max}$ yang mungkin dicapai oleh system
- Biaya sebagai fungsi dari selang peningkatan dimana ada perbedaan atantara nilai $R_{i,min}$ dan $R_{i,max}$
- Eksponen pada persamaan mendekati tak terhingga ketika keandalan mendekati titik maksimal yang mungkin dicapai. Biaya selalu meningkat seiring dengan peningkatan keandalan komponen

Fungsi biaya peningkatan keandalan sistem pada persamaan (2.25) tidak memiliki satuan, dalam hal ini peranannya hanya sebagai pembobot biaya peningkatan nilai keandalan suatu sistem dari nilai keandalan sekarang terhadap system lain dalam suatu sistem yang dioptimasi. Beberapa asumsi yang dipakai dalam penggunaan fungsi biaya pada persamaan yaitu:

- Peningkatan biaya sebagai fungsi dari nilai keandalan system

- Sistem keandalan yang tinggi memiliki biaya yang tinggi
- Sistem keandalan yang rendah memiliki biaya yang rendah

2.12 Analisa Biaya Pemeliharaan

Dalam Proses pemeliharaan dan operasi peralatan timbul biaya – biaya yang timbul akibat pemeliharaan terencana dan biaya yang timbul akibat terjadi kerusakan mendadak atau tidak terencana. Biaya perawatan terencana terdiri atas biaya penggantian komponen dan biaya tenaga kerja. Biaya akibat terjadi kerusakan terdiri atas biaya suku cadang, biaya tenaga kerja dan kehilangan pendapatan akibat kerusakan.

Biaya Kerusakan (C_f) adalah biaya yang terjadi akibat kerusakan komponen kritis yang diluar perkiraan yang mengakibatkan kerugian pendapatan perusahaan. Biaya ini terdiri dari biaya suku cadang, biaya akibat kehilangan pendapatan dan biaya tenaga kerja yang dihitung sebagai berikut (Lewis, 1987)

$$C_f = [(Biaya tenaga kerja + Kehilangan pendapatan akibat kerusakan) \times Rata - rata waktu penggantian] + biaya pembelian suku cadang komponen$$

Biaya perawatan terencana merupakan biaya yang terjadi karena adanya perawatan terencana yang dijadwalkan perusahaan. Dalam perhitungan ini biaya kehilangan pendapatan akibat kerusakan tidak dimasukkan jadi:

$$C_p = [(Biaya tenaga kerja \times Rata - rata waktu penggantian) + biaya pembelian suku cadang komponen]$$

Sedangkan total biaya pemeliharaan dari suatu komponen untuk kurun/ jangka waktu tertentu adalah (Lewis, 1987):

$$C = ((1-R(t)) \times C_f) + (R(t) \times C_p) \quad (2.27)$$

Dimana :

- C = Total biaya pemeliharaan
- R(t) = keandalan system dalam kurun waktu t
- C_f = Biaya yang timbul akibat kerusakan mendadak
- C_p = Biaya perawatan terencana

2.13 Posisi Penelitian

Suhandoko (2011) melakukan penelitian dengan judul “Penentuan Interval Pemeliharaan Pencegahan dengan Meminimalkan Laju Biaya Berdasarkan

Alokasi dan Optimasi Keandalan pada Peralatan Seksi Penggilingan”. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan interval waktu pemeliharaan dengan melakukan alokasi dan optimasi keandalan peralatan. Hasil dari penelitian ini adalah diperoleh interval waktu pemeliharaan pencegahan peralatan yang terpanjang sebesar 300,5 jam dan interval waktu pemeliharaan pencegahan peralatan yang terpendek sebesar 69,2 jam pada saat target keandalan sistem sebesar 90%.

Suharjito (2011) melakukan penelitian dengan judul “Penentuan Interval Waktu Perawatan Peralatan pada Sistem Plant-1 dengan Meminimalkan Laju Biaya Total Perawatan”. Penelitian ini bertujuan menentukan interval waktu perawatan sistem plant-1 dengan meminimalkan laju total biaya perawatan. Hasil dari penelitian ini adalah didapatkan interval waktu perawatan pencegahan terpanjang selama 3100jam dan terpendek yaitu 180 jam.

Hardiyanto (2017) melakukan penelitian dengan judul “Penentuan Interval Waktu Perawatan Pencegahan pada Peralatan *Gas Compression System* (GCS) di PT Pertamina Hulu Energi”. Penelitian ini bertujuan menentukan interval waktu perawatan pencegahan dari unit GCS, yang dapat meminimalkan laju biaya perawatan pencegahan. Hasil dari penelitian adalah total laju biaya perawatan unit GCS nilainya lebih rendah 2,8% dari sebelumnya.

Wijaya (2018) melakukan penelitian dengan judul “Penentuan Interval Waktu Pemeliharaan Pencegahan Berdasarkan Metode Alokasidan Optimasi Keandalan pada Peralatan Sub Unit Sistem Sirkulasi Air dan Uapdi Blok 1. Penelitian ini bertujuan menentukan interval waktu pemeliharaan pencegahan dengan metode alokasi dan optimasi keandalan peralatan. Hasil dari penelitian didapatkan interval waktu pemeliharaan pencegahan sub-sub unit terpanjang dimiliki oleh sub-sub unit penguapan air dengan tekanan rendah sebesar 8.606 jam dan terpendek dimiliki oleh sub-sub unit pemanasan awal air sebesar 273 jam. Penurunan laju biaya total pemeliharaan pencegahan per siklus adalah Rp. 818.611.762 per siklus pada saat target keandalan sub unit sistem sirkulasi air dan uap sebesar 0,9.

Penelitian ini menggunakan metode yang berbeda dengan sebelumnya. Penelitian sebelumnya tidak melihat detail kerusakan peralatan, dimana setiap kerusakan peralatan dalam bentuk *work order* tidak semuanya termasuk kategori

downtime. Penelitian ini mengkombinasikan metode *system & equipment reliability prioritization* (SERP) dan optimasi keandalan peralatan pada turbin gas.

BAB 3

METODE PENELITIAN

Penelitian memerlukan sebuah metode yang berisi tentang langkah-langkah terstruktur untuk mendapatkan suatu hasil penelitian yang benar. Langkah-langkah dasar yang dilakukan untuk mencapai tujuan dari penelitian adalah sebagai berikut:

1. Studi lapangan dan pustaka
2. Penetapan perumusan masalah dan tujuan penelitian
3. Pengambilan data
4. Pengolahan data
5. Penarikan kesimpulan dan pemberian saran

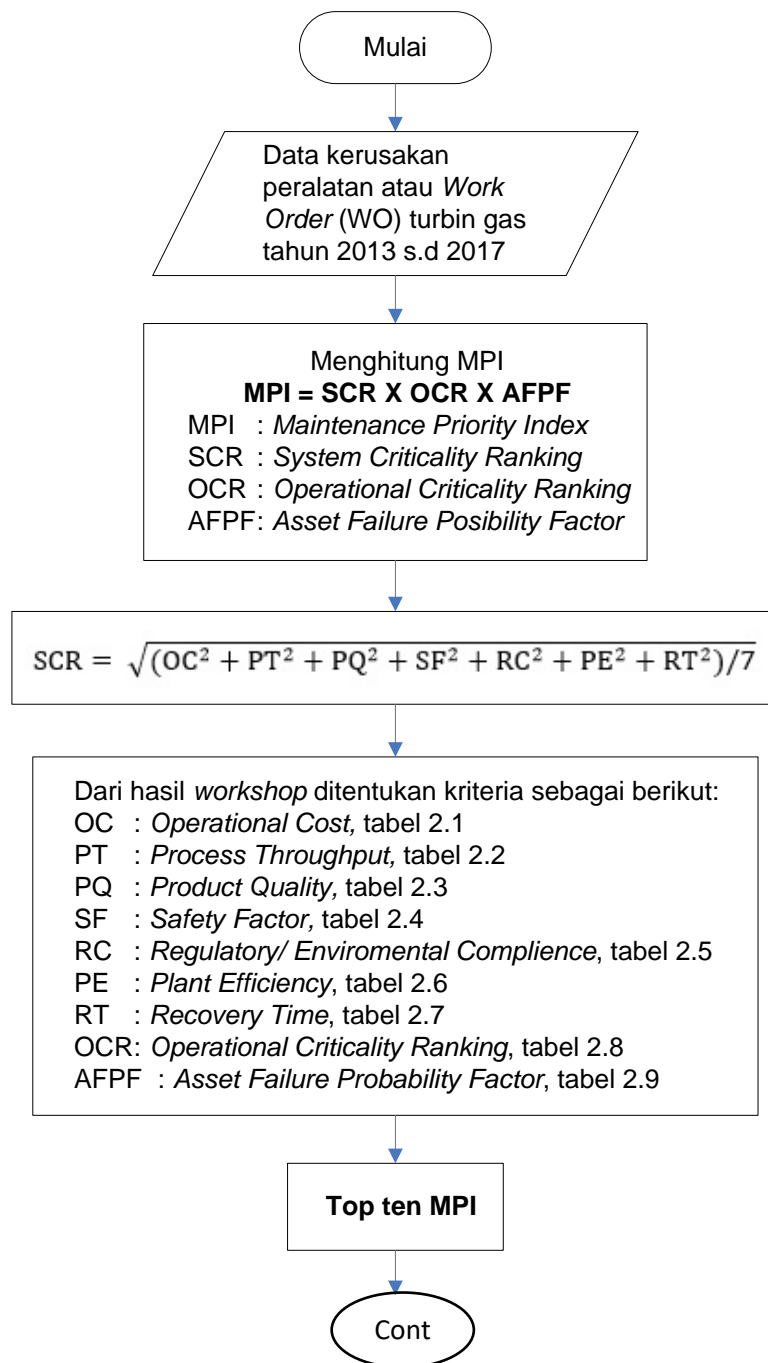
Untuk mempermudah memahami dan mengikuti langkah-langkah tersebut dapat dilihat pada diagram alir yang ditunjukkan pada gambar 3.1.

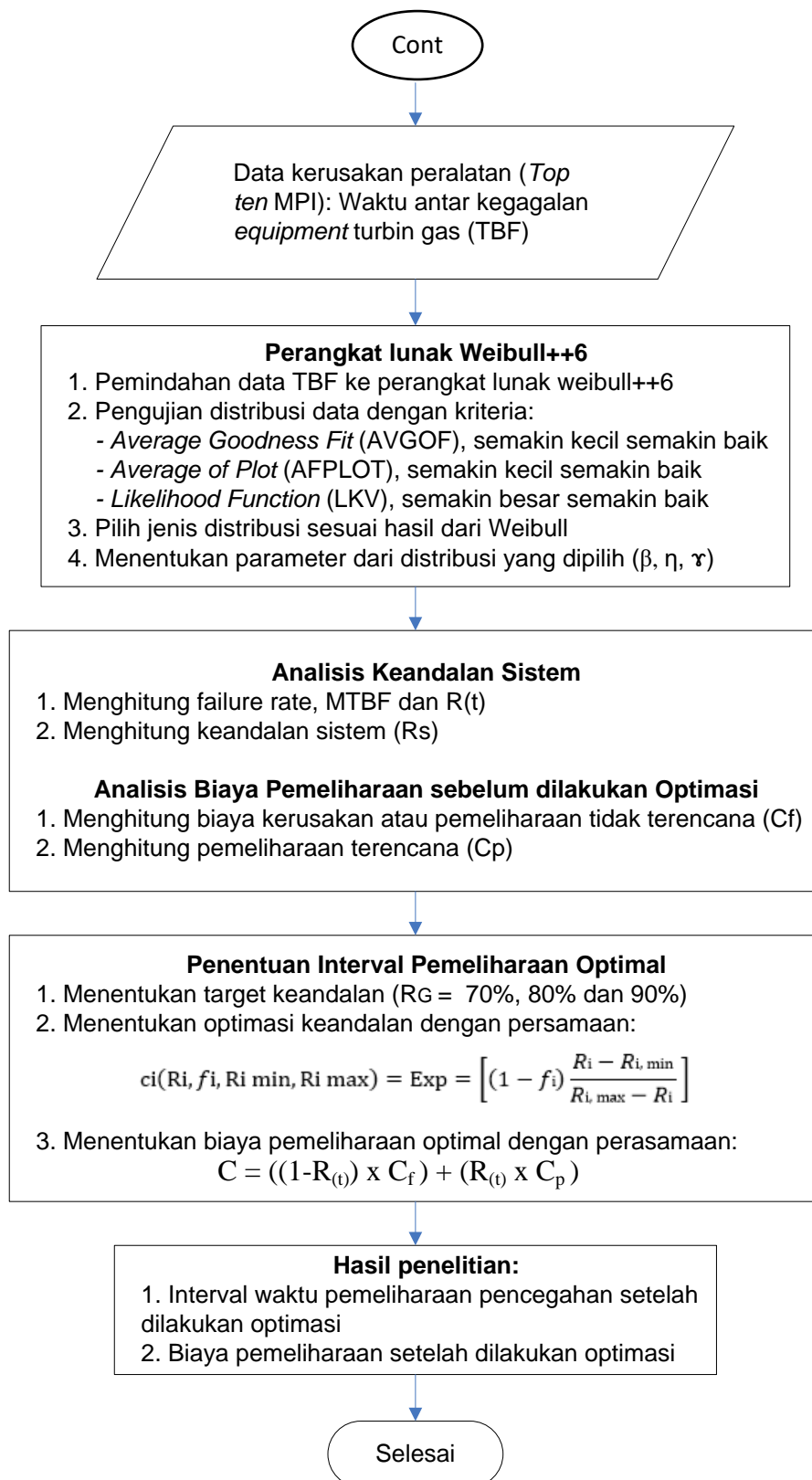
3.1 Studi Lapangan dan Pustaka

Pada penelitian ini sistem yang menjadi obyek penelitian adalah turbin gas tipe M701D pada blok 2 di PT. Z, dengan pola operasi (frekuensi *start-stop* nya) tinggi. Kemudian dilakukan pengambilan data kerusakan peralatan berupa *Work Order* (WO) yang diambil dari *Ellipse* dan biaya pemeliharaan dari bidang perencanaan pemeliharaan (Rendal Har). Selanjutnya landasan teori yang digunakan dalam penelitian menggunakan literatur berupa buku maupun jurnal yang berhubungan dengan analisis keandalan dan manajemen pemeliharaan.

3.2 Penetapan Perumusan Masalah dan Tujuan Penelitian

Setelah melakukan studi lapangan, identifikasi masalah dan studi pustaka, maka tahap selanjutnya adalah merumuskan pokok permasalahan yang dihadapi dan tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini.





Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian

3.3 Pengumpulan Data

Pengumpulan data yang terkait dengan *history* kerusakan peralatan turbin gas meliputi:

- a. Data klasifikasi peralatan turbin gas.
- b. Data kerusakan peralatan berupa *Work Order* (WO) yang diambil dari *Ellipse*.
- c. Data kerusakan peralatan divalidasi apakah merupakan data *downtime* atau bukan.
- d. Data penggantian komponen dan biaya pemeliharaan dari bidang Perencanaan Pemeliharaan.
- e. Data potensi kerugian produksi dari bidang Niaga dan Perencanaan Pemeliharaan.

3.4 Pengolahan Data

Pengolahan data pada penelitian ini menggunakan metode *System and Equipment Reliability Priorization* (SERP) dan Optimasi Keandalan.

- a. Menentukan *Maintenance Priority Index* (MPI)

Untuk menentukan MPI dilakukan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Mengadakan workshop dengan bidang Engineering, Operasi dan Pemeliharaan untuk menentukan beberapa kriteria sebagai berikut: *System Criticality Ranking* (SCR), *Operational Criticality Ranking* (OCR) dan *Asset Failure Probability Factor* (AFPF). Kriteria tersebut ditentukan sesuai dengan tabel 2.1 sampai dengan tabel 2.9.
2. Melakukan perhitungan MPI dengan menggunakan persamaan 2.1. Selanjutnya diperoleh nilai MPI dan ditentukan *top ten* peralatan turbin gas yang akan dianalisa dengan optimasi keandalan.
- b. Optimasi keandalan dengan perangkat lunak *Weibull++6* dengan langkah-langkah sebagai berikut:
 1. Mengkonversi data kerusakan peralatan yang termasuk *top ten* MPI peralatan turbin gas menjadi data waktu antar kegagalan (TBF).
 2. Melakukan pemindahan data (*time between failure*) TBF ke perangkat lunak *Weibull++6*.

3. Melakukan pengujian distribusi data dengan menggunakan kriteria sebagai berikut:
 - *Average Goodness of Fit* (AvGOF), nilainya semakin kecil semakin baik
 - *Average of Plot* (AvPlot), nilainya semakin kecil semakin baik
 - *Likelihood Fuction Ratio* (LKV), nilainya semakin besar semakin baik
4. Pilih jenis distribusi dari hasil pengolahan oleh perangkat lunak *Weibull++6*, kemudian tentukan parameter β , η dan γ .
5. Melakukan analisis keandalan sistem turbin gas dengan menghitung *residual reliability* dan *residual life* dengan menggunakan *Weibull++6*.
6. Melakukan perhitungan biaya pemeliharaan terencana (Cp) dan biaya pemeliharaan tidak terencana (Cf).
7. Menentukan alokasi keandalan optimal pada peralatan turbin gas.
8. Menentukan interval waktu pemeliharaan setelah dilakukan optimasi keandalan dengan menggunakan *Weibull++6* dan menentukan biaya pemeliharaan dengan persamaan 2.26.

3.5 Kesimpulan dan Saran

Pada tahapan ini diberikan kesimpulan dan saran dari hasil rangkaian penelitian yang sudah dicapai dan pemberian saran-saran terhadap perusahaan maupun penelitian selanjutnya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

PENGOLAHAN DATA

4.1 *System & Equipment Reliability Prioritization (SERP)*

Failure Defense Planning (FDP) adalah sebuah pendekatan teknik untuk mencapai kehandalan operational yang maksimum di dalam penempatan perencanaan pemeliharaan. FDP membentuk signifikansi system dan peralatan bagi proses secara keseluruhan berdasarkan pada biaya, ketersediaan peralatan, keamanan produksi, persoalan lingkungan, persoalan mutu produk dan bisnis lainnya. Level pertama FDP dilakukan melalui *System & Equipment Reliability Prioritization* (SERP). Dengan menggunakan SERP diperoleh peringkat prioritas pemeliharaan atau nilai *Maintenance Prioritization Index* (MPI).

Input data yang digunakan untuk menentukan MPI adalah data *Work Order* (WO) dengan status *completed* pada unit turbin gas blok 2, mulai tahun 2013 sampai dengan tahun 2017. Untuk melakukan perhitungan MPI digunakan persamaan 2.1 dan 2.2, sedangkan untuk menentukan kriteria penilaian atau pembobotan parameter PT, OC, PQ, SF, RC dan AFPP menggunakan tabel kriteria 2.1 sampai dengan 2.9. Berikut hasil perhitungan MPI pada peralatan turbin gas di PT. Z, detail perhitungan semua komponen terdapat di lampiran.

Perhitungan MPI peralatan turbin dengan menggunakan persamaan 2.1 sebagai berikut:

$$MPI = SCR \times OCR \times AFPP$$

Untuk menentukan *System criticality ranking* (SCR), setiap sistem atau peralatan diukur berdasarkan tujuh aspek (fungsi dan nilai) dengan menggunakan persamaan 2.2:

$$SCR = \sqrt{(OC^2 + PT^2 + PQ^2 + SF^2 + RC^2 + PE^2 + RT^2)/7}$$

Dari hasil workshop ditentukan nilai ketujuh aspek berdasarkan kriteria pada tabel 2.1 sampai dengan tabel 2.7.

$$SCR = \sqrt{(10^2 + 8^2 + 8^2 + 6^2 + 2^2 + 10^2 + 6^2)/7} = 7,597$$

$$SCR = 7,597$$

Selanjutnya untuk menentukan kriteria *Operational Criticality Ranking* (OCR) dengan mempertimbangkan dampak peralatan terhadap sistem sesuai tabel 2.8.

Sedangkan *Asset criticality ranking* (ACR) merupakan kombinasi SCR dan OCR:

$$ACR = SCR \times OCR = 7,597 \times 10$$

$$ACR = 75,97$$

Asset Failure Probability Factor (AFPF) ditentukan berdasarkan kriteria pada tabel 2.9, kemudian digabungkan dengan ACR untuk membentuk *Maintenance Priority Index* (MPI).

$$MPI = ACR \times AFPF = 75,97 \times 6$$

$$MPI \text{ turbin} = 455,8$$

Berikut ini merupakan *top ten equipment* peringkat MPI pada sistem turbin gas:

Tabel 4. 1 *Maintenance Prioritization Index* (MPI) turbin gas

No	Equipment	PT	OC	PQ	SF	RC	PE	RT	SCR	OCR	ACR	AFPF	MPI
1	Turbin	8	10	8	6	2	10	6	7,60	10,0	76,0	6,0	455,8
2	Rotor cooling air	8	10	8	6	2	10	6	7,60	10,0	76,0	6,0	455,8
3	Exciter set	8	6	8	6	6	10	8	7,56	10,0	75,6	6,0	453,6
4	Generator	8	10	8	4	4	5	10	7,42	10,0	74,2	6,0	445,0
5	Combuster shell	8	10	6	2	2	5	6	6,20	10,0	62,0	6,0	371,9
6	Main transformer	10	10	2	6	2	10	10	7,96	10,0	79,6	4,0	318,6
7	Piping fuel gas supply	10	6	2	4	2	1	4	5,03	10,0	50,3	6,0	301,7
8	Main lube oil system	10	4	10	6	6	5	4	6,86	6,0	41,1	6,0	246,8
9	Compressor	10	6	4	2	2	5	4	5,52	10,0	55,2	4,0	220,6
10	Digital controller	6	10	2	4	4	1	8	5,82	8,0	46,5	4,0	186,2

Dari hasil workshop pembahasan SERP yang telah dilaksanakan pada tanggal 13 November 2018 di PT. Z yang melibatkan *expert* bidang Operasi, Pemeliharaan dan Engineering diperoleh *top ten equipment* MPI pada sistem turbin gas (lihat tabel 4.1). Peringkat MPI paling atas adalah peralatan *turbin*, yang mana merupakan peralatan yang menjadi prioritas pemeliharaan. Berikut pembahasan kriteria MPI pada masing-masing peralatan turbin gas:

1. Turbin

Turbin merupakan bagian utama dari sistem turbin gas, yang memiliki peran penting sebagai media merubah energi panas hasil pembakaran menjadi energi mekanis (putar). Turbin terdiri dari beberapa komponen, antara lain sudu

putar (*rotor*), sudu diam (*stator*), *casing turbin*, *expansion joint*, *bearing turbin*. Permasalahan yang sering terjadi pada turbin adalah terjadinya kenaikan vibrasi, terjadinya kebocoran pada *casing turbin* maupun *flexible joint*. Kerusakan pada peralatan turbin menimbulkan *operational cost* untuk perbaikan atau *repair spare parts* memerlukan biaya pemeliharaan lebih dari Rp. 500.000.000,00 dan pada saat perbaikan mengharuskan unit turbin gas harus *shutdown* (dimatikan). Jika terjadi permasalahan pada turbin mengakibatkan kemampuan *ramp rate* turun sampai dengan 50% dan menimbulkan kondisi *dangerous situation* dan *low personnel injury*. Kerusakan yang terjadi pada turbin tidak berdampak berarti terhadap lingkungan, namun berdampak besar pada penurunan *plant efficiency*. Apabila terjadi kerusakan pada komponen utama turbin, untuk pemulihan membutuhkan waktu 1-2 bulan dikarenakan untuk pemesanan *part* utama yang harus diganti. Peringkat *operational criticality ranking* (OCR) pada peralatan turbin sangat tinggi dikarenakan tidak ada sistem *back-up* dan setiap tahunnya paling tidak terjadi sekali kegagalan.



Sudu putar turbin



Flexible joint

Gambar 4. 1 Komponen turbin

2. *Rotor Cooling Air*

Rotor cooling air (RCA) berfungsi untuk menyerap panas dari udara yang diekstraksi dari *compressor* yang selanjutnya digunakan untuk mendinginkan sudu putar turbin. RCA merupakan peralatan *heat exchanger* (HE) yang terdiri dari *sheel*, *water channel*, *tube sheet*, *baffle plates*, *cooling tube* dan lainnya. Jenis HE vertikal ini adalah *U-tube*. Udara yang didinginkan mengalir melewati bagian luar

tube sepanjang *tube bundle* kemudian keluar *cooler*. Sedangkan air pendingin dialirkan melalui bagian dalam *tube*. Permasalahan yang sering terjadi pada RCA adalah terjadinya kebocoran pada *tube RCA cooler* dan *flanges line RCA*. Kerusakan pada peralatan turbin menimbulkan *operational cost* untuk perbaikan atau *repair spare parts* memerlukan biaya pemeliharaan lebih dari Rp. 500.000.000,00 dan pada saat perbaikan mengharuskan unit turbin gas harus *shutdown* (dimatikan). Jika terjadi permasalahan pada RCA mengakibatkan kemampuan *ramp rate* turun sampai dengan 50% dan menimbulkan kondisi *dangerous situation* dan *low personnel injury*. Kerusakan yang terjadi pada RCA tidak berdampak berarti terhadap lingkungan, namun berdampak besar pada penurunan *plant efficiency*. Apabila terjadi kerusakan pada komponen utama RCA, untuk pemulihan membutuhkan waktu 1-2 bulan dikarenakan untuk pemesanan *part* utama yang harus diganti. Peringkat *operational criticality ranking* (OCR) pada peralatan RCA sangat tinggi dikarenakan tidak ada sistem *back-up* dan setiap tahunnya paling tidak terjadi sekali kegagalan.



RCA Cooler



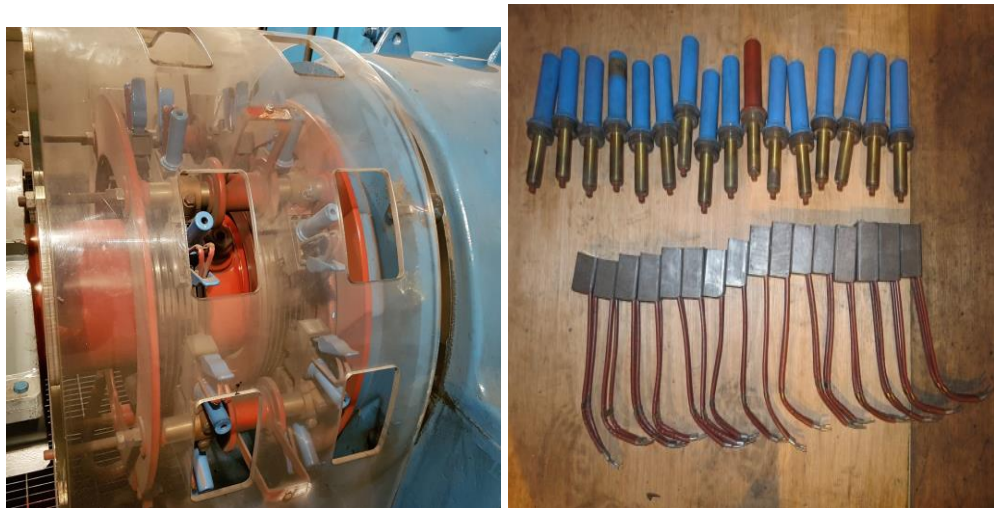
Tube RCA

Gambar 4. 2 Rotor Cooling Air (RCA)

3. Exciter set

Sistem eksitasi adalah sistem pasokan listrik DC sebagai penguatan pada generator listrik atau sebagai pembangkit medan magnet, sehingga suatu generator dapat menghasilkan energi listrik dengan besar tegangan keluaran generator

bergantung pada besarnya arus eksitasinya. *Exciter set* terdiri dari komponen utama, yaitu *excitation transformer*, *system proteksi trafo excitation*, *excitation system*, *brush excitaion*. Permasalahan yang sering terjadi pada *exciter set* adalah terjadinya sistem *exciter trouble* karena kondisi *card module* sudah memasuki masa *life time*. Kerusakan pada peralatan *exciter set* menimbulkan *operational cost* untuk perbaikan atau *repair spare parts* memerlukan biaya pemeliharaan Rp.50.000.000,00 sampai dengan Rp. 100.000.000,00 dan pada saat perbaikan mengharuskan unit turbin gas harus *shutdown* (dimatikan). Jika terjadi permasalahan pada *exciter set* mengakibatkan kemampuan *ramp rate* turun sampai dengan 50% dan menimbulkan kondisi *dangerous situation* dan *low personnel injury*. Kerusakan yang terjadi pada *exciter set* diharuskan membuat laporan insiden dan berdampak besar pada penurunan *plant efficiency*. Apabila terjadi kerusakan pada komponen utama *exciter set*, untuk pemulihan membutuhkan waktu 2-6 bulan dikarenakan untuk pemesanan *part* utama yang harus diganti. Peringkat *operational criticality ranking* (OCR) pada peralatan *exciter set* sangat tinggi dikarenakan tidak ada sistem *back-up* dan setiap tahunnya paling tidak terjadi sekali kegagalan.



Gambar 4. 3 Exciter set

4. Generator

Generator berfungsi untuk menghasilkan listrik dengan cara mengubah energi gerak menjadi energi listrik. Generator terdiri dari beberapa komponen antarlain *stator winding*, *stator core*, *generator cooler*, *rotor shaft*, *rotor winding* dan *rotor*

fan. Permasalahan yang sering terjadi pada generator adalah terjadinya vibrasi pada sisi *rotor* generator dikarenakan kondisi belitan *rotor* generator pendinginannya kurang maksimal. Sedangkan kerusakan pada peralatan generator menimbulkan *operational cost* untuk perbaikan atau *repair spare parts* memerlukan biaya pemeliharaan lebih dari Rp. 500.000.000,00 dan pada saat perbaikan mengharuskan unit turbin gas harus *shutdown* (dimatikan). Jika terjadi permasalahan pada generator mengakibatkan kemampuan *ramp rate* turun sampai dengan 50% dan menimbulkan kondisi *low dangerous situation* dan *low personnel injury*. Kerusakan yang terjadi pada generator diharuskan melaporkan dan berdampak sedang pada penurunan *plant efficiency*. Apabila terjadi kerusakan pada komponen utama generator, untuk pemulihan membutuhkan waktu lebih dari 6 bulan dikarenakan untuk pemesanan *part* utama yang harus diganti. Peringkat *operational criticality ranking* (OCR) pada peralatan generator sangat tinggi dikarenakan tidak ada sistem *back-up* dan setiap tahunnya paling tidak terjadi sekali kegagalan.



Gambar 4. 4 Generator

5. *Combuster shell*

Combuster shell merupakan tempat terjadinya pembakaran campuran bahan bakar dan udara dengan penyalaan awal menggunakan *igniter* yang mana menghasilkan energi panas untuk menggerakkan turbin. *Combuster shell* terdiri dari beberapa komponen, antarlain *transition piece*, *combuster basket*, *nozzle* bahan bakar gas dan minyak, *flame detector*. Permasalahan yang sering terjadi pada *combuster shell* adalah terjadinya pembakaran yang tidak sempurna

dikarenakan terjadi *plugging* pada *nozzle* bahan bakar. Sedangkan kerusakan pada peralatan *combuster shell* menimbulkan *operational cost* untuk perbaikan atau *repair spare parts* memerlukan biaya pemeliharaan lebih dari Rp. 500.000.000,00 dan pada saat perbaikan mengharuskan unit turbin gas harus *shutdown* (dimatikan). Jika terjadi permasalahan pada *combuster shell* mengakibatkan kemampuan *ramp rate* turun sampai dengan 25%. Kerusakan yang terjadi pada *combuster shell* tidak berdampak pada keamanan dan lingkungan, namun berdampak pada penurunan *plant efficiency* dengan kategori sedang. Apabila terjadi kerusakan pada komponen utama *combuster shell*, untuk pemulihan membutuhkan waktu 1-6 bulan dikarenakan untuk pemesanan *part* utama yang harus diganti. Peringkat *operational criticality ranking* (OCR) pada peralatan *combuster shell* sangat tinggi dikarenakan tidak ada sistem *back-up* dan setiap tahunnya paling tidak terjadi sekali kegagalan.



Gambar 4. 5 *Combuster shell*

6. *Main transformer*

Main transformer adalah sebuah alat untuk mentransfer energi listrik dari sirkuit satu ke sirkuit yang lain melalui sepasang konduktor induktif berupa lilitan. Jenis trafo pada pembangkit adalah trafo *step up* yang berfungsi untuk menaikkan tegangan sebelum dikirim ke jaringan distribusi 150 KV/ 500 KV. Permasalahan yang sering terjadi pada *main transformer* adalah terjadinya gangguan pada sistem proteksi. Sedangkan kerusakan pada peralatan *main transformer* menimbulkan *operational cost* untuk perbaikan atau *repair spare parts* memerlukan biaya

pemeliharaan lebih dari Rp. 500.000.000,00. Jika terjadi permasalahan pada *main transformer* mengakibatkan unit turbin gas *trip* dan kemampuan *ramp rate* turun sampai dengan 25%. Kerusakan yang terjadi pada *main transformer* menimbulkan kondisi *dangerous situation* dan *low personnel injury* namun tidak berdampak terhadap lingkungan. Sedangkan dampak pada penurunan *plant efficiency* sangat besar. Apabila terjadi kerusakan pada komponen utama *main transformer*, untuk pemulihan membutuhkan waktu 6 bulan dikarenakan untuk penggantian *part* utama. Peringkat *operational criticality ranking* (OCR) pada peralatan *main transformer* sangat tinggi dikarenakan tidak ada sistem *back-up*, namun frekuensi kegagalan jarang terjadi atau terjadi sekali dalam beberapa tahun.



Gambar 4. 6 *Main transformer*

7. *Piping fuel gas supply*

Piping fuel gas supply adalah *line* yang dilalui oleh bahan bakar gas, yang terdiri dari *line gas*, *control valve* bahan bakar gas dan *servo control valve* bahan bakar gas. Permasalahan yang sering terjadi pada *piping fuel gas supply* adalah terjadi hunting pada pembukaan *control valve* bahan bakar dikarenakan kondisi *filter servo* maupun *servo* itu sendiri. Sedangkan kerusakan pada peralatan *piping fuel gas supply* menimbulkan *operational cost* untuk perbaikan atau *repair spare parts* memerlukan biaya pemeliharaan sekitar Rp. 50.000.000,00 sampai dengan

Rp. 100.000.000,00. Jika terjadi permasalahan pada *piping fuel gas supply* mengakibatkan unit turbin gas *trip*, namun tidak berdampak terhadap kemampuan *ramp rate*. Kerusakan yang terjadi pada *piping fuel gas supply* menimbulkan kondisi *low dangerous situation* dan *low personnel injury* namun tidak berdampak terhadap lingkungan dan *plant efficiency*. Apabila terjadi kerusakan pada komponen utama *Piping fuel gas supply*, untuk pemulihan membutuhkan waktu 1-4 minggu dikarenakan untuk penggantian *part* utama. Peringkat *operational criticality ranking* (OCR) pada peralatan *piping fuel gas supply* sangat tinggi dikarenakan tidak ada sistem *back-up* dan frekuensi kegagalan setidaknya terjadi sekali dalam setahun.



Gambar 4. 7 *Control valve* bahan bakar gas

8. *Main lube Oil System*

Main lube oil system terdiri dari beberapa komponen yaitu *auxiliary oil pump* (AOP), *emergency oil pump* (EOP), *main lube oil pump* (MOP), *lube oil filter* dan *storage tank*. Permasalahan yang sering terjadi pada *main lube oil system* adalah terjadi kebocoran pada *line* dan *plugging* pada *filter lube oil*. Sedangkan kerusakan pada peralatan *main lube oil system* menimbulkan *operational cost* untuk perbaikan atau *repair spare parts* memerlukan biaya pemeliharaan sekitar Rp. 10.000.000,00 sampai dengan Rp. 50.000.000,00. Jika terjadi permasalahan pada *main lube oil system* mengakibatkan unit turbin gas *trip* dan berdampak

terhadap kemampuan *ramp rate* turun sampai dengan 75%. Kerusakan yang terjadi pada *main lube oil system* menimbulkan kondisi *dangerous situation* dan *low personnel injury* dan berdampak terhadap lingkungan yang mengharuskan membuat laporan insiden, sedangkan dampak terhadap *plant efficiency* termasuk kategori sedang. Apabila terjadi kerusakan pada komponen utama *main lube oil system*, untuk pemulihan membutuhkan waktu 1-4 minggu dikarenakan untuk penggantian *part* utama. Peringkat *operational criticality ranking* (OCR) pada peralatan *main lube oil system* termasuk kategori sedang dikarenakan ada sistem *back-up* dan frekuensi kegagalan setidaknya terjadi sekali dalam setahun.



Gambar 4. 8 *Main lube oil system*

9. *Compressor*

Compressor berfungsi untuk mengkompresi udara yang akan digunakan untuk pembakaran di ruang bakar. Kompresor terdiri dari beberapa bagian yaitu *intake air filter* (IAF), *inlet guide vane* (IGV), sudu putar (*rotor*) dan sudu diam (*stator*). Permasalahan yang sering terjadi pada *compressor* adalah terjadi gangguan pada pembukaan IGV dikarenakan sistem hidrolisnya. Sedangkan kerusakan pada peralatan *compressor* menimbulkan *operational cost* untuk perbaikan atau *repair spare parts* memerlukan biaya pemeliharaan sekitar Rp. 50.000.000,00 sampai dengan Rp. 100.000.000,00. Jika terjadi permasalahan pada *compressor* mengakibatkan unit turbin gas *trip* dan berdampak kemampuan *ramp rate* turun

kurang dari 25%. Kerusakan yang terjadi pada *compressor* tidak berdampak terhadap keamanan dan lingkungan. Apabila terjadi kerusakan pada komponen utama *compressor*, berdampak pada *plant efficiency* dan untuk pemulihan membutuhkan waktu 1-4 minggu dikarenakan untuk penggantian *part* utama. Peringkat *Operational Criticality Ranking* (OCR) pada peralatan *compressor* termasuk kategori sedang dikarenakan ada sistem *back-up* dan frekuensi kegagalan terjadi sekali dalam beberapa tahun.



Gambar 4. 9 Inlet Guide Vane

10. Digital controller (DDC)

Digital controller merupakan pusat pengendali sistem kontrol pada turbin gas, yang terdiri dari *computer processing unit* (CPU), *servo module*, *analog* dan *digital module*. Permasalahan yang sering terjadi pada *digital controller* adalah terjadi gangguan pada CPU DDC. Sedangkan kerusakan pada peralatan *digital controller* menimbulkan *operational cost* untuk perbaikan atau *repair spare parts* memerlukan biaya pemeliharaan lebih dari Rp. 500.000.000,00. Jika terjadi permasalahan pada *digital controller* mengakibatkan unit turbin gas berpotensi *trip*, namun tidak berdampak langsung terhadap kemampuan *ramp rate*. Kerusakan yang terjadi pada *digital controller* menimbulkan kondisi *low dangerous situation* dan *low personnel injury* tidak berdampak terhadap keamanan dan lingkungan. Apabila terjadi kerusakan pada komponen utama *digital controller*, untuk pemulihan membutuhkan waktu 2-8 bulan dikarenakan untuk penggantian *part* utama. Peringkat *operational criticality ranking* (OCR)

pada peralatan *digital controller* termasuk kategori sedang dikarenakan ada sistem *back-up* dan frekuensi kegagalan terjadi sekali dalam beberapa tahun.



Gambar 4. 10 *Digital Controller (DDC)*

4.2 Analisis keandalan peralatan turbin gas

Dari *top ten MPI equipment* turbin gas pada tabel 4.1 dilakukan analisa keandalan pada peralatan turbin gas tersebut. Analisa keandalan dilakukan dengan bantuan perangkat lunak *Weibull++6* dengan data inputan berupa waktu antar kegagalan (TBF) masing-masing peralatan turbin gas. Berikut analisa kegagalan pada peralatan turbin gas:

4.2.1 Analisis keandalan peralatan turbin

Berdasarkan data waktu antar kegagalan yang diperoleh dari *Ellipse8* (terlampir), dilakukan uji distribusi dengan bantuan perangkat lunak *Weibull++6*. Berikut hasil uji distribusi pada peralatan turbin:

Tabel 4. 2 Tabel uji distribusi peralatan turbin

<i>Distribution</i>	<i>AvGOF</i>	<i>AvPlot</i>	<i>LKV</i>	<i>Ranking</i>
<i>Exponential 1</i>	13,05708990	5,40238958	-253,630830	3
<i>Exponential 2</i>	49,90188120	5,30468713	-256,162460	5
<i>Weibull 2</i>	30,02622850	6,61235153	-254,753720	4
<i>Weibull 3</i>	0,04797100	2,67058546	-248,968070	1
<i>Normal</i>	87,08751050	9,47292508	-266,333730	6
<i>Lognormal</i>	3,00168919	3,43689916	-251,602350	2

Penentuan jenis distribusi waktu antar kegagalan pada tabel 4.2 dengan bantuan perangkat lunak *Weibull++6* menggunakan tiga macam pengujian distribusi:

a. *Average Goodness of Fit* (AvGOF)

Uji *goodness of fit* berdasarkan pada uji *Kolmogorov-Smirnov* (KS) dengan membandingkan distribusi empiris data dengan distribusi teoritis tertentu yang dihipotesiskan. Nilai AvGOF adalah selisih dari nilai data aktual dan data yang dihasilkan dari referensi distribusi yang dimiliki software *Weibull++6* (Reliasoft, 2005). Sehingga semakin kecil AvGOF maka semakin baik distribusi yang diuji dibandingkan dengan yang lain. Pada tabel 4.2 nilai AvGOF terkecil dengan nilai = 0,04797100, jenis distribusi yang paling sesuai adalah *Weibull 3*.

b. *Average of Plot* (AvPlot)

AvPlot didasarkan pada *normalized index* dari uji *plot of fit*. Hasil uji ditunjukkan dalam *AvPlot index* yang merupakan normalisasi dari koefisien korelasi (ρ'), nilai koefisien korelasi adalah $-1 \leq \rho' \leq 1$. Pada perangkat lunak *Weibull++6*, nilai AvPlot index didapatkan dengan melakukan normalisasi dari koefisien korelasi. Jika semakin kecil nilai AvPlot, maka distribusi yang diuji akan lebih baik dari pada yang lain. Pada tabel 4.2 nilai AvPlot terkecil dengan nilai = 2,67058546, jenis distribusi yang paling sesuai adalah *Weibull 3*.

c. *Likelihood Function Ratio* (LKV)

Uji ini berdasarkan pada *likelihood ratio* yang menggambarkan berapa kali terdapat kecocokan suatu kelompok data terhadap karakteristik suatu model. *Likelihood ratio* diukur berdasarkan nilai logaritmanya sehingga sering disebut *log-likelihood ratio*. Ketentuan nilai LKV adalah semakin besar nilainya semakin baik untuk distribusi yang diuji. Pada tabel 4.2 nilai LKV terbesar dengan nilai = -248,968070, jenis distribusi yang paling sesuai adalah *Weibull 3*.

Dari ketiga jenis pengujian distribusi dengan menggunakan perangkat lunak *Weibull++6* pada tabel 4.2, dapat disimpulkan bahwa jenis distribusi yang paling sesuai adalah distribusi *Weibull 3*. Setelah ditentukan jenis distribusi kemudian ditentukan parameter-parameter *Weibull 3*. Dengan menggunakan perangkat lunak *Weibull++6* diperoleh:

Parameter bentuk (β) = 0,8013

Parameter skala (η) = 3143,746

Parameter lokasi (Υ) = 348,26

4.2.2 Analisis keandalan peralatan *Combuster*

Berdasarkan data waktu antar kegagalan yang diperoleh dari *Ellipse8* (terlampir), dilakukan uji distribusi dengan bantuan perangkat lunak *Weibull++6*.

Berikut hasil uji distribusi pada peralatan *combuster*:

Tabel 4. 3 Tabel uji distribusi peralatan *combuster*

<i>Distribution</i>	<i>AvGOF</i>	<i>AvPlot</i>	<i>LKV</i>	<i>Ranking</i>
<i>Exponential 1</i>	1,86210779	4,00168410	-201,90640	2
<i>Exponential 2</i>	23,76533800	5,59164778	-200,30759	4
<i>Weibull 2</i>	6,92868451	4,55716665	-201,78049	3
<i>Weibull 3</i>	0,88906445	2,90493502	-200,86560	1
<i>Normal</i>	47,91500890	6,39724823	-207,53833	6
<i>Lognormal</i>	11,55499840	4,20250868	-202,33354	5

Penentuan jenis distribusi waktu antar kegagalan pada tabel 4.2 dengan bantuan perangkat lunak *Weibull++6* menggunakan tiga macam pengujian distribusi:

a. *Average Goodness of Fit* (AvGOF)

Uji *goodness of fit* berdasarkan pada uji *Kolmogorov-Smirnov* (KS) dengan membandingkan distribusi empiris data dengan distribusi teoritis tertentu yang dihipotesiskan. Nilai AvGOF adalah selisih dari nilai data aktual dan data yang dihasilkan dari referensi distribusi yang dimiliki software *Weibull++6* (Reliasoft, 2005). Sehingga semakin kecil AvGOF maka semakin baik distribusi yang diuji dibandingkan dengan yang lain. Pada tabel 4.3 nilai AvGOF terkecil dengan nilai = 0,88906445, jenis distribusi yang paling sesuai adalah *Weibull 3*.

b. *Average of Plot* (AvPlot)

AvPlot didasarkan pada *normalized index* dari uji *plot of fit*. Hasil uji ditunjukkan dalam *AvPlot index* yang merupakan normalisasi dari koefisien korelasi (ρ'), nilai koefisien korelasi adalah $-1 \leq \rho' \leq 1$. Pada perangkat lunak *Weibull++6*, nilai AvPlot index didapatkan dengan melakukan normalisasi dari koefisien korelasi. Jika semakin kecil nilai AvPlot, maka distribusi yang diuji

akan lebih baik dari pada yang lain. Pada tabel 4.3 nilai AvPlot terkecil dengan nilai = 2,90493502, jenis distribusi yang paling sesuai adalah *Weibull 3*.

c. *Likelihood Function Ratio (LKV)*

Uji ini berdasarkan pada *likelihood ratio* yang menggambarkan berapa kali terdapat kecocokan suatu kelompok data terhadap karakteristik suatu model. *Likelihood ratio* diukur berdasarkan nilai logaritmanya sehingga sering disebut *log-likelihood ratio*. Ketentuan nilai LKV adalah semakin besar nilainya semakin baik untuk distribusi yang diuji. Pada tabel 4.3 nilai LKV terbesar dengan nilai = -200,86560, jenis distribusi yang paling sesuai adalah *Weibull 3*.

Dari ketiga jenis pengujian distribusi dengan menggunakan perangkat lunak *Weibull++6* pada tabel 4.3, dapat disimpulkan bahwa jenis distribusi yang paling sesuai adalah distribusi *Weibull 3*. Setelah ditentukan jenis distribusi kemudian ditentukan parameter-parameter *Weibull 3*. Dengan menggunakan perangkat lunak *Weibull++6* diperoleh:

Parameter bentuk (β) = 0,8
 Parameter skala (η) = 5161,221
 Parameter lokasi (Υ) = 5161,221

4.2.3 Analisis keandalan *Rotor Cooling Air (RCA)*

Berdasarkan data waktu antar kegagalan yang diperoleh dari *Ellipse8* (terlampir), dilakukan uji distribusi dengan bantuan perangkat lunak *Weibull++6*. Berikut hasil uji distribusi pada peralatan *rotor cooling air*:

Tabel 4. 4 Tabel uji distribusi peralatan RCA

<i>Distribution</i>	<i>AvGOF</i>	<i>AvPlot</i>	<i>LKV</i>	<i>Ranking</i>
<i>Exponential 1</i>	0,50996876	3,10870497	-167,24484	3
<i>Exponential 2</i>	0,33497879	3,1485603	-167,00485	1
<i>Weibull 2</i>	0,11901894	3,149074	-167,16457	1
<i>Weibull 3</i>	0,11383584	3,15692109	-167,26089	2
<i>Normal</i>	42,7784590	7,36323837	-172,73345	5
<i>Lognormal</i>	14,9694830	4,54523806	-168,28423	4

Penentuan jenis distribusi waktu antar kegagalan pada tabel 4.4 dengan bantuan perangkat lunak *Weibull++6* menggunakan tiga macam pengujian distribusi:

a. *Average Goodness of Fit* (AvGOF)

Uji *goodness of fit* berdasarkan pada uji *Kolmogorov-Smirnov* (KS) dengan membandingkan distribusi empiris data dengan distribusi teoritis tertentu yang dihipotesiskan. Nilai AvGOF adalah selisih dari nilai data aktual dan data yang dihasilkan dari referensi distribusi yang dimiliki software *Weibull++6* (Reliasoft, 2005). Sehingga semakin kecil AvGOF maka semakin baik distribusi yang diuji dibandingkan dengan yang lain. Pada tabel 4.4 nilai AvGOF terkecil dengan nilai = 0,11901894, jenis distribusi yang paling sesuai adalah *Weibull 3*.

b. *Average of Plot* (AvPlot)

AvPlot didasarkan pada *normalized index* dari uji *plot of fit*. Hasil uji ditunjukkan dalam AvPlot *index* yang merupakan normalisasi dari koefisien korelasi (ρ'), nilai koefisien korelasi adalah $-1 \leq \rho' \leq 1$. Pada perangkat lunak *Weibull++6*, nilai AvPlot index didapatkan dengan melakukan normalisasi dari koefisien korelasi. Jika semakin kecil nilai AvPlot, maka distribusi yang diuji akan lebih baik dari pada yang lain. Pada tabel 4.4 nilai AvPlot terkecil dengan nilai = 3,149074, jenis distribusi yang paling sesuai adalah *Weibull 2*.

c. *Likelihood Function Ratio* (LKV)

Uji ini berdasarkan pada *likelihood ratio* yang menggambarkan berapa kali terdapat kecocokan suatu kelompok data terhadap karakteristik suatu model. *Likelihood ratio* diukur berdasarkan nilai logaritmanya sehingga sering disebut *log-likelihood ratio*. Ketentuan nilai LKV adalah semakin besar nilainya semakin baik untuk distribusi yang diuji. Pada tabel 4.4 nilai LKV terbesar dengan nilai = -167,16457, jenis distribusi yang paling sesuai adalah *Weibull 2*.

Dari ketiga jenis pengujian distribusi dengan menggunakan perangkat lunak *Weibull++6* pada tabel 4.4, dapat disimpulkan bahwa jenis distribusi yang paling sesuai adalah distribusi *Weibull 2*. Setelah ditentukan jenis distribusi kemudian ditentukan parameter-parameter *Weibull 2*. Dengan menggunakan perangkat lunak *Weibull++6* diperoleh:

Parameter bentuk (β) = 1,0319

Parameter skala (η) = 4227,734

Parameter lokasi (Υ) = 0

4.2.4 Analisis keandalan peralatan *Exciter*

Berdasarkan data waktu antar kegagalan yang diperoleh dari *Ellipse8* (terlampir), dilakukan uji distribusi dengan bantuan perangkat lunak *Weibull++6*.

Berikut hasil uji distribusi pada peralatan *exciter*:

Tabel 4. 5 Tabel uji distribusi peralatan *exciter*

<i>Distribution</i>	<i>AvGOF</i>	<i>AvPlot</i>	<i>LKV</i>	<i>Ranking</i>
<i>Exponential 1</i>	0,00011010	2,77480957	-80,666349	3
<i>Exponential 2</i>	0,00004415	2,89526317	-80,836764	3
<i>Weibull 2</i>	0,00001308	2,90054138	-80,586167	2
<i>Weibull 3</i>	0,00002003	2,67276869	-80,572553	1
<i>Normal</i>	10,60934550	8,30721862	-83,114143	5
<i>Lognormal</i>	0,00002131	3,65013003	-80,837748	4

Penentuan jenis distribusi waktu antar kegagalan pada tabel 4.5 dengan bantuan perangkat lunak *Weibull++6* menggunakan tiga macam pengujian distribusi:

a. *Average Goodness of Fit (AvGOF)*

Uji *goodness of fit* berdasarkan pada uji *Kolmogorov-Smirnov* (KS) dengan membandingkan distribusi empiris data dengan distribusi teoritis tertentu yang dihipotesiskan. Nilai AvGOF adalah selisih dari nilai data aktual dan data yang dihasilkan dari referensi distribusi yang dimiliki software *Weibull++6* (Reliasoft, 2005). Sehingga semakin kecil AvGOF maka semakin baik distribusi yang diuji dibandingkan dengan yang lain. Pada tabel 4.5 nilai AvGOF terkecil dengan nilai = 0,00001308, jenis distribusi yang paling sesuai adalah *Weibull 2*.

b. *Average of Plot (AvPlot)*

AvPlot didasarkan pada *normalized index* dari uji *plot of fit*. Hasil uji ditunjukkan dalam *AvPlot index* yang merupakan normalisasi dari koefisien korelasi (ρ'), nilai koefisien korelasi adalah $-1 \leq \rho' \leq 1$. Pada perangkat lunak *Weibull++6*, nilai AvPlot index didapatkan dengan melakukan normalisasi dari koefisien korelasi. Jika semakin kecil nilai AvPlot, maka distribusi yang diuji akan lebih baik dari pada yang lain. Pada tabel 4.5 nilai AvPlot terkecil dengan nilai = 2,67276869, jenis distribusi yang paling sesuai adalah *Weibull 3*.

c. *Likelihood Function Ratio (LKV)*

Uji ini berdasarkan pada *likelihood ratio* yang menggambarkan berapa kali terdapat kecocokan suatu kelompok data terhadap karakteristik suatu model. *Likelihood ratio* diukur berdasarkan nilai logaritmanya sehingga sering disebut *log-likelihood ratio*. Ketentuan nilai LKV adalah semakin besar nilainya semakin baik untuk distribusi yang diuji. Pada tabel 4.5 nilai LKV terbesar dengan nilai = -80,572553, jenis distribusi yang paling sesuai adalah *Weibull 3*.

Dari ketiga jenis pengujian distribusi dengan menggunakan perangkat lunak *Weibull++6* pada tabel 4.5, dapat disimpulkan bahwa jenis distribusi yang paling sesuai adalah distribusi *Weibull 3*. Setelah ditentukan jenis distribusi kemudian ditentukan parameter-parameter *Weibull 3*. Dengan menggunakan perangkat lunak *Weibull++6* diperoleh:

Parameter bentuk (β) = 0,9617
Parameter skala (η) = 3035,539
Parameter lokasi (Υ) = 52,03

4.2.5 Analisis keandalan peralatan Generator

Berdasarkan data waktu antar kegagalan yang diperoleh dari *Ellipse8* (terlampir), dilakukan uji distribusi dengan bantuan perangkat lunak *Weibull++6*. Berikut hasil uji distribusi pada peralatan generator:

Tabel 4. 6 Tabel uji distribusi peralatan generator

<i>Distribution</i>	<i>AvGOF</i>	<i>AvPlot</i>	<i>LKV</i>	<i>Ranking</i>
<i>Exponential 1</i>	1,53866298	6,37145056	-153,47495	4
<i>Exponential 2</i>	0,89304757	5,85613133	-153,01620	2
<i>Weibull 2</i>	0,0000044525	3,22121638	-153,27973	1
<i>Weibull 3</i>	0,0000756	2,54225814	-153,11118	1
<i>Normal</i>	0,83132653	5,11970626	-154,74541	3
<i>Lognormal</i>	0,65805833	5,55605343	-155,11399	3

Penentuan jenis distribusi waktu antar kegagalan pada tabel 4.6 dengan bantuan perangkat lunak *Weibull++6* menggunakan tiga macam pengujian distribusi:

a. *Average Goodness of Fit (AvGOF)*

Uji *goodness of fit* berdasarkan pada uji *Kolmogorov-Smirnov (KS)* dengan membandingkan distribusi empiris data dengan distribusi teoritis tertentu yang

dihipotesiskan. Nilai AvGOF adalah selisih dari nilai data aktual dan data yang dihasilkan dari referensi distribusi yang dimiliki software *Weibull++6* (Reliasoft, 2005). Sehingga semakin kecil AvGOF maka semakin baik distribusi yang diuji dibandingkan dengan yang lain. Pada tabel 4.6 nilai AvGOF terkecil dengan nilai = 0,0000044525, jenis distribusi yang paling sesuai adalah *Weibull 2*.

b. *Average of Plot (AvPlot)*

AvPlot didasarkan pada *normalized index* dari uji *plot of fit*. Hasil uji ditunjukkan dalam AvPlot *index* yang merupakan normalisasi dari koefisien korelasi (ρ'), nilai koefisien korelasi adalah $-1 \leq \rho' \leq 1$. Pada perangkat lunak *Weibull++6*, nilai AvPlot index didapatkan dengan melakukan normalisasi dari koefisien korelasi. Jika semakin kecil nilai AvPlot, maka distribusi yang diuji akan lebih baik dari pada yang lain. Pada tabel 4.6 nilai AvPlot terkecil dengan nilai = 2,54225814, jenis distribusi yang paling sesuai adalah *Weibull 3*.

c. *Likelihood Function Ratio (LKV)*

Uji ini berdasarkan pada *likelihood ratio* yang menggambarkan berapa kali terdapat kecocokan suatu kelompok data terhadap karakteristik suatu model. *Likelihood ratio* diukur berdasarkan nilai logaritmanya sehingga sering disebut *log-likelihood ratio*. Ketentuan nilai LKV adalah semakin besar nilainya semakin baik untuk distribusi yang diuji. Pada tabel 4.6 nilai LKV terbesar dengan nilai = -153,11118, jenis distribusi yang paling sesuai adalah *Weibull 3*.

Dari ketiga jenis pengujian distribusi dengan menggunakan perangkat lunak *Weibull++6* pada tabel 4.6, dapat disimpulkan bahwa jenis distribusi yang paling sesuai adalah distribusi *Weibull 2 dan 3*. Setelah ditentukan jenis distribusi kemudian ditentukan parameter-parameter *Weibull 2 dan 3*. Dengan menggunakan perangkat lunak *Weibull++6* diperoleh:

Parameter bentuk (β)	= 1,0579
Parameter skala (η)	= 11468
Parameter lokasi (Υ)	= 0

4.2.6 Analisis keandalan *Main Transformer* (MTR)

Berdasarkan data waktu antar kegagalan yang diperoleh dari *Ellipse8* (terlampir), dilakukan uji distribusi dengan bantuan perangkat lunak *Weibull++6*.

Berikut hasil uji distribusi pada peralatan *main transformer*:

Tabel 4. 7 Tabel uji distribusi peralatan MTR

<i>Distribution</i>	<i>AvGOF</i>	<i>AvPlot</i>	<i>LKV</i>	<i>Ranking</i>
<i>Exponential 1</i>	98,1130989	13,2584502	-171,56928	4
<i>Exponential 2</i>	94,8750092	11,6511470	-177,39406	3
<i>Weibull 2</i>	83,4771412	12,9039676	-179,96176	3
<i>Weibull 3</i>	11,9373216	3,6912278	-159,52168	1
<i>Normal</i>	99,0976197	14,0318347	-185,09464	5
<i>Lognormal</i>	58,2896055	9,2174352	-167,53355	2

Penentuan jenis distribusi waktu antar kegagalan pada tabel 4.7 dengan bantuan perangkat lunak *Weibull++6* menggunakan tiga macam pengujian distribusi:

a. *Average Goodness of Fit* (AvGOF)

Uji *goodness of fit* berdasarkan pada uji *Kolmogorov-Smirnov* (KS) dengan membandingkan distribusi empiris data dengan distribusi teoritis tertentu yang dihipotesiskan. Nilai AvGOF adalah selisih dari nilai data aktual dan data yang dihasilkan dari referensi distribusi yang dimiliki software *Weibull++6* (Reliasoft, 2005). Sehingga semakin kecil AvGOF maka semakin baik distribusi yang diuji dibandingkan dengan yang lain. Pada tabel 4.7 nilai AvGOF terkecil dengan nilai = 11,9373216, jenis distribusi yang paling sesuai adalah *Weibull 3*.

b. *Average of Plot* (AvPlot)

AvPlot didasarkan pada *normalized index* dari uji *plot of fit*. Hasil uji ditunjukkan dalam AvPlot *index* yang merupakan normalisasi dari koefisien korelasi (ρ'), nilai koefisien korelasi adalah $-1 \leq \rho' \leq 1$. Pada perangkat lunak *Weibull++6*, nilai AvPlot index didapatkan dengan melakukan normalisasi dari koefisien korelasi. Jika semakin kecil nilai AvPlot, maka distribusi yang diuji akan lebih baik dari pada yang lain. Pada tabel 4.7 nilai AvPlot terkecil dengan nilai = 3,6912278, jenis distribusi yang paling sesuai adalah *Weibull 3*.

c. *Likelihood Function Ratio* (LKV)

Uji ini berdasarkan pada *likelihood ratio* yang menggambarkan berapa kali terdapat kecocokan suatu kelompok data terhadap karakteristik suatu model.

Likelihood ratio diukur berdasarkan nilai logaritmanya sehingga sering disebut *log-likelihood ratio*. Ketentuan nilai LKV adalah semakin besar nilainya semakin baik untuk distribusi yang diuji. Pada tabel 4.7 nilai LKV terbesar dengan nilai = -159,52168, jenis distribusi yang paling sesuai adalah *Weibull 3*.

Dari ketiga jenis pengujian distribusi dengan menggunakan perangkat lunak *Weibull++6* pada tabel 4.7, dapat disimpulkan bahwa jenis distribusi yang paling sesuai adalah distribusi *Weibull 3*. Setelah ditentukan jenis distribusi kemudian ditentukan parameter-parameter *Weibull 3*. Dengan menggunakan perangkat lunak *Weibull++6* diperoleh:

Parameter bentuk (β) = 0,5385
 Parameter skala (η) = 2265,668
 Parameter lokasi (γ) = 1072,815

4.2.7 Analisis keandalan *fuel gas system*

Berdasarkan data waktu antar kegagalan yang diperoleh dari *Ellipse8* (terlampir), dilakukan uji distribusi dengan bantuan perangkat lunak *Weibull++6*. Berikut hasil uji distribusi pada peralatan *fuel gas system*:

Tabel 4. 8 Tabel uji distribusi peralatan *fuel gas system*

<i>Distribution</i>	<i>AvGOF</i>	<i>AvPlot</i>	<i>LKV</i>	<i>Ranking</i>
<i>Exponential 1</i>	0,89493753	3,85880192	-112,68637	3
<i>Exponential 2</i>	0,54961461	3,97507323	-112,39788	2
<i>Weibull 2</i>	0,23734436	3,95676190	-112,39135	1
<i>Weibull 3</i>	1,34541311	3,94874538	-112,05698	2
<i>Normal</i>	1,56256549	6,85820553	-115,97472	5
<i>Lognormal</i>	9,18824925	4,66669223	-112,61758	4

Penentuan jenis distribusi waktu antar kegagalan pada tabel 4.8 dengan bantuan perangkat lunak *Weibull++6* menggunakan tiga macam pengujian distribusi:

a. *Average Goodness of Fit (AvGOF)*

Uji *goodness of fit* berdasarkan pada uji *Kolmogorov-Smirnov (KS)* dengan membandingkan distribusi empiris data dengan distribusi teoritis tertentu yang dihipotesiskan. Nilai *AvGOF* adalah selisih dari nilai data aktual dan data yang dihasilkan dari referensi distribusi yang dimiliki software *Weibull++6* (Reliasoft, 2005). Sehingga semakin kecil *AvGOF* maka semakin baik distribusi yang diuji

dibandingkan dengan yang lain. Pada tabel 4.8 nilai AvGOF terkecil dengan nilai = 0,23734436, jenis distribusi yang paling sesuai adalah *Weibull 2*.

b. *Average of Plot* (AvPlot)

AvPlot didasarkan pada *normalized index* dari uji *plot of fit*. Hasil uji ditunjukkan dalam AvPlot *index* yang merupakan normalisasi dari koefisien korelasi (ρ'), nilai koefisien korelasi adalah $-1 \leq \rho' \leq 1$. Pada perangkat lunak *Weibull++6*, nilai AvPlot index didapatkan dengan melakukan normalisasi dari koefisien korelasi. Jika semakin kecil nilai AvPlot, maka distribusi yang diuji akan lebih baik dari pada yang lain. Pada tabel 4.8 nilai AvPlot terkecil dengan nilai = 3,94874538, jenis distribusi yang paling sesuai adalah *Weibull 3*.

c. *Likelihood Function Ratio* (LKV)

Uji ini berdasarkan pada *likelihood ratio* yang menggambarkan berapa kali terdapat kecocokan suatu kelompok data terhadap karakteristik suatu model. *Likelihood ratio* diukur berdasarkan nilai logaritmanya sehingga sering disebut *log-likelihood ratio*. Ketentuan nilai LKV adalah semakin besar nilainya semakin baik untuk distribusi yang diuji. Pada tabel 4.8 nilai LKV terbesar dengan nilai = -112,05698, jenis distribusi yang paling sesuai adalah *Weibull 3*.

Dari ketiga jenis pengujian distribusi dengan menggunakan perangkat lunak *Weibull++6* pada tabel 4.8, dapat disimpulkan bahwa jenis distribusi yang paling sesuai adalah distribusi *Weibull 3*. Setelah ditentukan jenis distribusi kemudian ditentukan parameter-parameter *Weibull 3*. Dengan menggunakan perangkat lunak *Weibull++6* diperoleh:

Parameter bentuk (β)	= 1,1419
Parameter skala (η)	= 4687,087
Parameter lokasi (Υ)	= 0

4.2.8 Analisis keandalan *Main Lube Oil System* (MOT)

Berdasarkan data waktu antar kegagalan yang diperoleh dari *Ellipse8* (terlampir), dilakukan uji distribusi dengan bantuan perangkat lunak *Weibull++6*.

Berikut hasil uji distribusi pada peralatan *main lube oil system*:

Tabel 4. 9 Tabel uji distribusi peralatan MOT

<i>Distribution</i>	<i>AvGOF</i>	<i>AvPlot</i>	<i>LKV</i>	<i>Ranking</i>
<i>Exponential 1</i>	2,4850691	5,66614015	-91,438203	4
<i>Exponential 2</i>	3,3247372	7,60944463	-90,274436	3
<i>Weibull 2</i>	5,8758774	6,13503366	-91,217187	5
<i>Weibull 3</i>	0,0686585	4,33291705	-90,676332	1
<i>Normal</i>	15,6090001	9,77709379	-93,261463	6
<i>Lognormal</i>	0,9896901	4,93196681	-91,277852	2

Penentuan jenis distribusi waktu antar kegagalan pada tabel 4.9 dengan bantuan perangkat lunak *Weibull++6* menggunakan tiga macam pengujian distribusi:

a. *Average Goodness of Fit (AvGOF)*

Uji *goodness of fit* berdasarkan pada uji *Kolmogorov-Smirnov (KS)* dengan membandingkan distribusi empiris data dengan distribusi teoritis tertentu yang dihipotesiskan. Nilai AvGOF adalah selisih dari nilai data aktual dan data yang dihasilkan dari referensi distribusi yang dimiliki software *Weibull++6* (Reliasoft, 2005). Sehingga semakin kecil AvGOF maka semakin baik distribusi yang diuji dibandingkan dengan yang lain. Pada tabel 4.9 nilai AvGOF terkecil dengan nilai = 0,0686585, jenis distribusi yang paling sesuai adalah *Weibull 3*.

b. *Average of Plot (AvPlot)*

AvPlot didasarkan pada *normalized index* dari uji *plot of fit*. Hasil uji ditunjukkan dalam *AvPlot index* yang merupakan normalisasi dari koefisien korelasi (ρ'), nilai koefisien korelasi adalah $-1 \leq \rho' \leq 1$. Pada perangkat lunak *Weibull++6*, nilai AvPlot index didapatkan dengan melakukan normalisasi dari koefisien korelasi. Jika semakin kecil nilai AvPlot, maka distribusi yang diuji akan lebih baik dari pada yang lain. Pada tabel 4.9 nilai AvPlot terkecil dengan nilai = 4,33291705, jenis distribusi yang paling sesuai adalah *Weibull 3*.

c. *Likelihood Function Ratio (LKV)*

Uji ini berdasarkan pada *likelihood ratio* yang menggambarkan berapa kali terdapat kecocokan suatu kelompok data terhadap karakteristik suatu model. *Likelihood ratio* diukur berdasarkan nilai logaritmanya sehingga sering disebut *log-likelihood ratio*. Ketentuan nilai LKV adalah semakin besar nilainya semakin

baik untuk distribusi yang diuji. Pada tabel 4.9 nilai LKV terbesar dengan nilai = -90,676332, jenis distribusi yang paling sesuai adalah *Weibull 3*.

Dari ketiga jenis pengujian distribusi dengan menggunakan perangkat lunak *Weibull++6* pada tabel 4.9, dapat disimpulkan bahwa jenis distribusi yang paling sesuai adalah distribusi *Weibull 3*. Setelah ditentukan jenis distribusi kemudian ditentukan parameter-parameter *Weibull 3*. Dengan menggunakan perangkat lunak *Weibull++6* diperoleh:

Parameter bentuk (β)	= 0,7481
Parameter skala (η)	= 8643,296
Parameter lokasi (Υ)	= 1084,938

4.2.9 Analisis keandalan *Compressor*

Berdasarkan data waktu antar kegagalan yang diperoleh dari *Ellipse8* (terlampir), dilakukan uji distribusi dengan bantuan perangkat lunak *Weibull++6*. Berikut hasil uji distribusi pada peralatan *compressor*:

Tabel 4. 10 Tabel uji distribusi peralatan *compressor*

<i>Distribution</i>	<i>AvGOF</i>	<i>AvPlot</i>	<i>LKV</i>	<i>Ranking</i>
<i>Exponential 1</i>	2,72064053	5,70583707	-104,69527	5
<i>Exponential 2</i>	0,51956360	5,99643313	-104,20544	2
<i>Weibull 2</i>	0,96570383	5,20227167	-104,97557	4
<i>Weibull 3</i>	0,00001285	3,37654205	-104,99603	1
<i>Normal</i>	0,02495100	4,59476735	-105,90614	3
<i>Lognormal</i>	13,8029203	7,94914694	-105,96565	6

Penentuan jenis distribusi waktu antar kegagalan pada tabel 4.10 dengan bantuan perangkat lunak *Weibull++6* menggunakan tiga macam pengujian distribusi:

a. *Average Goodness of Fit (AvGOF)*

Uji *goodness of fit* berdasarkan pada uji *Kolmogorov-Smirnov (KS)* dengan membandingkan distribusi empiris data dengan distribusi teoritis tertentu yang dihipotesiskan. Nilai AvGOF adalah selisih dari nilai data aktual dan data yang dihasilkan dari referensi distribusi yang dimiliki software *Weibull++6* (Reliasoft, 2005). Sehingga semakin kecil AvGOF maka semakin baik distribusi yang diuji dibandingkan dengan yang lain. Pada tabel 4.10 nilai AvGOF terkecil dengan nilai = 0,00001285, jenis distribusi yang paling sesuai adalah *Weibull 3*.

b. *Average of Plot* (AvPlot)

AvPlot didasarkan pada *normalized index* dari uji *plot of fit*. Hasil uji ditunjukkan dalam AvPlot *index* yang merupakan normalisasi dari koefisien korelasi (ρ'), nilai koefisien korelasi adalah $-1 \leq \rho' \leq 1$. Pada perangkat lunak *Weibull++6*, nilai AvPlot index didapatkan dengan melakukan normalisasi dari koefisien korelasi. Jika semakin kecil nilai AvPlot, maka distribusi yang diuji akan lebih baik dari pada yang lain. Pada tabel 4.10 nilai AvPlot terkecil dengan nilai = 3,37654205, jenis distribusi yang paling sesuai adalah *Weibull 3*.

c. *Likelihood Function Ratio* (LKV)

Uji ini berdasarkan pada *likelihood ratio* yang menggambarkan berapa kali terdapat kecocokan suatu kelompok data terhadap karakteristik suatu model. *Likelihood ratio* diukur berdasarkan nilai logaritmanya sehingga sering disebut *log-likelihood ratio*. Ketentuan nilai LKV adalah semakin besar nilainya semakin baik untuk distribusi yang diuji. Pada tabel 4.10 nilai LKV terbesar dengan nilai = -104,20544, jenis distribusi yang paling sesuai adalah *Exponential 2*.

Dari ketiga jenis pengujian distribusi dengan menggunakan perangkat lunak *Weibull++6* pada tabel 4.10, dapat disimpulkan bahwa jenis distribusi yang paling sesuai adalah distribusi *Weibull 3*. Setelah ditentukan jenis distribusi kemudian ditentukan parameter-parameter *Weibull 3*. Dengan menggunakan perangkat lunak *Weibull++6* diperoleh:

Parameter bentuk (β)	= 1,3202
Parameter skala (η)	= 17051
Parameter lokasi (Υ)	= -1908,44

4.2.10 Analisis keandalan *Digital Controller* (DDC)

Berdasarkan data waktu antar kegagalan yang diperoleh dari *Ellipse8* (terlampir), dilakukan uji distribusi dengan bantuan perangkat lunak *Weibull++6*.

Berikut hasil uji distribusi pada peralatan *digital controller*:

Tabel 4. 11 Tabel uji distribusi peralatan DDC

<i>Distribution</i>	<i>AvGOF</i>	<i>AvPlot</i>	<i>LKV</i>	<i>Ranking</i>
<i>Exponential 1</i>	0,0097927	5,38425375	-101,04597	5
<i>Exponential 2</i>	0,0026145	4,62533808	-100,38347	2
<i>Weibull 2</i>	0,0019195	4,31221445	-100,59240	1
<i>Weibull 3</i>	0,0180260	4,62326236	-100,46228	3
<i>Normal</i>	14,577561	7,09774036	-103,67407	6
<i>Lognormal</i>	0,0045020	5,38463316	-100,75478	4

Penentuan jenis distribusi waktu antar kegagalan pada tabel 4.11 dengan bantuan perangkat lunak *Weibull++6* menggunakan tiga macam pengujian distribusi:

a. *Average Goodness of Fit (AvGOF)*

Uji *goodness of fit* berdasarkan pada uji *Kolmogorov-Smirnov (KS)* dengan membandingkan distribusi empiris data dengan distribusi teoritis tertentu yang dihipotesiskan. Nilai *AvGOF* adalah selisih dari nilai data aktual dan data yang dihasilkan dari referensi distribusi yang dimiliki software *Weibull++6* (Reliasoft, 2005). Sehingga semakin kecil *AvGOF* maka semakin baik distribusi yang diuji dibandingkan dengan yang lain. Pada tabel 4.11 nilai *AvGOF* terkecil dengan nilai = 0,0019195, jenis distribusi yang paling sesuai adalah *Weibull 2*.

b. *Average of Plot (AvPlot)*

AvPlot didasarkan pada *normalized index* dari uji *plot of fit*. Hasil uji ditunjukkan dalam *AvPlot index* yang merupakan normalisasi dari koefisien korelasi (ρ'), nilai koefisien korelasi adalah $-1 \leq \rho' \leq 1$. Pada perangkat lunak *Weibull++6*, nilai *AvPlot index* didapatkan dengan melakukan normalisasi dari koefisien korelasi. Jika semakin kecil nilai *AvPlot*, maka distribusi yang diuji akan lebih baik dari pada yang lain. Pada tabel 4.11 nilai *AvPlot* terkecil dengan nilai = 4,31221445, jenis distribusi yang paling sesuai adalah *Weibull 2*.

c. *Likelihood Function Ratio (LKV)*

Uji ini berdasarkan pada *likelihood ratio* yang menggambarkan berapa kali terdapat kecocokan suatu kelompok data terhadap karakteristik suatu model. *Likelihood ratio* diukur berdasarkan nilai logaritmanya sehingga sering disebut *log-likelihood ratio*. Ketentuan nilai *LKV* adalah semakin besar nilainya semakin

baik untuk distribusi yang diuji. Pada tabel 4.11 nilai LKV terbesar dengan nilai = -100,38347, jenis distribusi yang paling sesuai adalah *Exponential 2*.

Dari ketiga jenis pengujian distribusi dengan menggunakan perangkat lunak *Weibull++6* pada tabel 4.10, dapat disimpulkan bahwa jenis distribusi yang paling sesuai adalah distribusi *Weibull 2*. Setelah ditentukan jenis distribusi kemudian ditentukan parameter-parameter *Weibull 2*. Dengan menggunakan perangkat lunak *Weibull++6* diperoleh:

Parameter bentuk (β) = 1,2113

Parameter skala (η) = 3877,666

4.2.11 Analisis keandalan system

Berikut parameter dari hasil uji distribusi dengan menggunakan *Weibull++6*:

Tabel 4. 12 Parameter hasil uji distribusi

No	Equipment	Distribusi	Beta (β)	Eta (η)	Gamma (γ)
1	Turbin	<i>Weibull 3</i>	0,80130	3143,7	348,26
2	<i>Rotor cooling air</i>	<i>Weibull 3</i>	0,80000	5161,2	335,56
3	<i>Exciter set</i>	<i>Weibull 2</i>	1,03190	4227,7	0
4	<i>Generator</i>	<i>Weibull 3</i>	0,96170	3035,5	52,03
5	<i>Combuster shell</i>	<i>Weibull 2</i>	1,05790	11468	0
6	<i>Main transformer</i>	<i>Weibull 3</i>	0,53850	2265,7	1072,82
7	<i>Piping fuel gas supply</i>	<i>Weibull 2</i>	1,14190	4687,1	0
8	<i>Main lube oil system</i>	<i>Weibull 3</i>	0,74810	8643,3	1084,94
9	<i>Compressor</i>	<i>Weibull 3</i>	1,32020	17051	-1908,44
10	<i>Digital controller</i>	<i>Weibull 2</i>	1,21130	3877,7	0

Dari nilai-nilai parameter keandalan pada tabel 4.12 dan menggunakan persamaan 2.12 didapatkan fungsi padat peluang masing-masing peralatan turbin gas. Berikut fungsi padat peluang sesuai dengan jenis distribusinya:

Tabel 4. 13 Fungsi padat peluang

No	Equipment	Fungsi padat peluang
1	Turbin	$f(t) = \frac{0,8013}{3143,74} \left[\frac{t - 348,26}{3143,74} \right]^{-0,1987} \exp \left[- \left(\frac{t - 348,26}{3143,74} \right)^{0,8013} \right]$
2	<i>Rotor cooling air</i>	$f(t) = \frac{0,8}{5161,22} \left[\frac{t - 335,56}{5161,22} \right]^{-0,2} \exp \left[- \left(\frac{t - 335,56}{5161,22} \right)^{0,8} \right]$
3	<i>Exciter set</i>	$f(t) = \frac{1,0319}{4227,73} \left[\frac{t}{4227,73} \right]^{0,0319} \exp \left[- \left(\frac{t}{4227,73} \right)^{1,0319} \right]$

4	<i>Generator</i>	$f(t) = \frac{0,9617}{3035,54} \left[\frac{t-52,03}{3035,54} \right]^{-0,0383} \exp \left[-\left(\frac{t-52,03}{3035,54} \right)^{0,9617} \right]$
5	<i>Combuster shell</i>	$f(t) = \frac{1,0579}{11468} \left[\frac{t}{11468} \right]^{0,0579} \exp \left[-\left(\frac{t}{11468} \right)^{1,0579} \right]$
6	<i>Main transformer</i>	$f(t) = \frac{0,5385}{2265,67} \left[\frac{t-1072,815}{2265,67} \right]^{-0,4615} \exp \left[-\left(\frac{t-1072,815}{2265,67} \right)^{0,5385} \right]$
7	<i>Piping fuel gas supply</i>	$f(t) = \frac{1,1419}{4687,087} \left[\frac{t}{4687,087} \right]^{0,1419} \exp \left[-\left(\frac{t}{4687,087} \right)^{1,1419} \right]$
8	<i>Main lube oil system</i>	$f(t) = \frac{0,7481}{8643,29} \left[\frac{t-1084,9375}{8643,29} \right]^{-0,2519} \exp \left[-\left(\frac{t-1084,9375}{8643,29} \right)^{0,7481} \right]$
9	<i>Compressor</i>	$f(t) = \frac{1,3202}{17051} \left[\frac{t+1908,44}{17051} \right]^{0,3202} \exp \left[-\left(\frac{t+1908,44}{17051} \right)^{1,3202} \right]$
10	<i>Digital controller</i>	$f(t) = \frac{1,2113}{3877,67} \left[\frac{t}{3877,67} \right]^{0,2113} \exp \left[-\left(\frac{t}{3877,67} \right)^{1,2113} \right]$

Dari nilai-nilai parameter keandalan pada tabel 4.12 dan menggunakan persamaan 2.13 didapatkan fungsi keandalan masing-masing peralatan turbin gas. Berikut fungsi keandalan sesuai dengan jenis distribusinya:

Tabel 4. 14 Fungsi keandalan

No	Equipment	Fungsi keandalan
1	Turbin	$R(t) = \exp \left[-\left(\frac{t-348,26}{3143,746} \right)^{0,8013} \right]$
2	<i>Rotor cooling air</i>	$R(t) = \exp \left[-\left(\frac{t-335,56}{5161,2214} \right)^{0,8} \right]$
3	<i>Exciter set</i>	$R(t) = \exp \left[-\left(\frac{t}{4227,7338} \right)^{1,0319} \right]$
4	<i>Generator</i>	$R(t) = \exp \left[-\left(\frac{t-52,03}{3035,539} \right)^{0,9617} \right]$
5	<i>Combuster shell</i>	$R(t) = \exp \left[-\left(\frac{t}{11468} \right)^{1,0579} \right]$
6	<i>Main transformer</i>	$R(t) = \exp \left[-\left(\frac{t-1072,815}{2265,6679} \right)^{0,5385} \right]$
7	<i>Piping fuel gas supply</i>	$R(t) = \exp \left[-\left(\frac{t}{4687,0867} \right)^{1,1419} \right]$
8	<i>Main lube oil system</i>	$R(t) = \exp \left[-\left(\frac{t-1084,9375}{8643,2963} \right)^{0,7481} \right]$
9	<i>Compressor</i>	$R(t) = \exp \left[-\left(\frac{t+1908,44}{17051} \right)^{1,3202} \right]$
10	<i>Digital controller</i>	$R(t) = \exp \left[-\left(\frac{t}{3877,6661} \right)^{1,2113} \right]$

Dari fungsi keandalan 4.14 dan pengolahan data menggunakan perangkat lunak *Weibull++6* diperoleh *residual* keandalan sebagai berikut:

Tabel 4. 15 Keandalan *residual equipment* gas turbin

No	Equipment	Residual life (jam)	R(t)
1	Turbin	3905,97	0,33147530
2	Rotor cooling air	6183,30	0,33118892
3	Exciter set	4174,19	0,37271800
4	Generator	3140,67	0,36174389
5	Combuster shell	8412,75	0,48648805
6	Main transformer	5060,16	0,25774158
7	Piping fuel gas supply	4469,96	0,38779495
8	Main lube oil system	8548,50	0,40818811
9	Compressor	10343,25	0,59637529
10	Digital controller	3638,87	0,39617586
R sistem turbin gas			0,00006941

Pada tabel 4.15 terlihat bahwa keandalan peralatan turbin gas rata-rata dibawah 0,5. Keandalan terkecil pada peralatan *main transformer*, dengan nilai keandalan R(t) sebesar 0,2577. *Main transformer* komponen penyusunnya sebagian besar merupakan peralatan *electrical* dan memiliki banyak sistem proteksi. Permasalahan yang sering terjadi pada *main transformer* adalah terjadinya gangguan pada sistem proteksi. Gangguan yang terjadi bisa dari sinyal palsu yang bekerja untuk memerintahkan sistem proteksi bekerja dan menyebabkan unit turbin gas *Trip*. Sedangkan keandalan terbesar adalah pada peralatan *compressor*, dengan nilai keandalan R(t) sebesar 0,5963. Kondisi aktualnya komponen *compressor* jarang mengalami gangguan dibandingkan peralatan turbin lainnya. Permasalahan yang sering terjadi pada *compressor* adalah terjadinya *plugging* pada *intake air filter* (IAF). Dengan dilaksanakan rutin pemeliharaan *preventif* pembersihan IAF permasalahan tersebut jarang terjadi.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

OPTIMASI KEANDALAN

5.1 Penentuan Interval Pemeliharaan Pencegahan Optimal

Untuk menentukan interval waktu pemeliharaan pencegahan yang optimal, terlebih dahulu dilakukan perhitungan keandalan optimal sesuai dengan target kinerja perusahaan PT. Z. Dimana induk perusahaan tersebut termasuk 10% pembangkit terbaik di dunia sesuai jenis dan kapasitas berdasarkan standar *North America Electricity Reliability Council* (NERC), sumber: *Annual Report* 2012 PT. PJB. Berikut kinerja pembangkit yang diakui oleh NERC antara lain:

- a. *Equivalent Availability Factor* (EAF) adalah faktor kesiapan unit pembangkit, nilai EAF berupa perbandingan yang didapatkan dari kesiapan pembangkit beroperasi (baik dalam kondisi *stand by* maupun operasi) dibagi terhadap waktu.
- b. *Equivalent Force Outage Rate* (EFOR) adalah tingkat ketidaksiapan unit pembangkit karena adanya keluar secara paksa yang disebabkan oleh gangguan peralatan (*outage*) dan penurunan kemampuan (*derating*).
- c. *Sudden Outage Frequency* (SdOF) adalah rata-rata jumlah gangguan mendadak unit pembangkit listrik dalam periode tertentu.

Tabel 5. 1 Kontrak kinerja PT. Z

No	Indikator	Satuan	Kontrak Kinerja 2018
1	EAF	Persen (%)	87,78
2	EFOR	Persen (%)	1,51
3	SdOF	Kali/ Unit	1,5

Penentuan target keandalan (RG) pada penelitian ini mengacu pada kontrak kinerja di PT. Z, dengan target keandalan sistem turbin gas yang realistis adalah sebesar: 0,7 ; 0,8 dan 0,9. Selanjutnya akan dilakukan penentuan alokasi keandalan optimal dengan menggunakan persamaan 2.26. Menurut Mettas (2000) “Keandalan sistem ditentukan oleh keandalan dari masing-masing komponen atau sub sistem tersebut. Namun pada kenyataannya historis data mengenai biaya detail tiap komponen peralatan sangat sulit didapatkan. Menurut Mettas (2000), apabila hal tersebut terjadi maka dengan memandang sifat-sifat dari fungsi biaya

maka dapat diformulasikan hubungan antara biaya dengan fungsi keandalan. Dengan menggunakan perangkat lunak *Lingo* 17.0 dan persamaan 2.26, ditentukan nilai alokasi keandalan optimal sebagai berikut:

$$C_i(R_i, f_i, R_{i \min}, R_{i \max}) = \text{Exp} \left[(1 - f_i) \frac{R_i - R_{i \min}}{R_{i \max} - R_{i \min}} \right]$$

Dimana :

Variabel (f_i) adalah *feasibility index* dengan menggunakan nilai pembobotan dari *Maintenance Priority Index* (MPI).

Variabel ($R_{i \min}$) adalah nilai keandalan awal (tabel 4.15)

Variabel ($R_{i \max}$) adalah nilai keandalan maksimum

$$C_i(R_i, f_i, R_{i \min}, R_{i \max}) = \text{Exp} (0,4558195*((R1-0,3314753)/(1-R1))) + \text{Exp} (0,4558195 *((R2-0,3311889)/(1-R2))) + \text{Exp} (0,4535574*((R3-0,372718)/(1-R3))) + \text{Exp} (0,4449719*((R4-0,3617439)/(1-R4))) + \text{Exp} (0,3719447*((R5-0,3764912)/(1-R5))) + \text{Exp} (0,3185682*((R6-0,2577416)/(1-R6))) + \text{Exp} (0,3017094*((R7-0,3877949)/(1-R7))) + \text{Exp} (0,2468036*((R8-0,3194156)/(1-R8))) + \text{Exp} (0,2206484*((R9-0,4696909)/(1-R9))) + \text{Exp} (0,1861981*((R10-0,3961759)/(1-R10)));$$

Dengan fungsi batasan sebagai berikut:

$$R1 * R2 * R3 * R4 * R5 * R6 * R7 * R8 * R9 * R10 \geq 0,8;$$

$$R1 \geq 0,3314753;$$

$$R1 \leq 1;$$

$$R2 \geq 0,3311889;$$

$$R2 \leq 1;$$

$$R3 \geq 0,372718;$$

$$R3 \leq 1;$$

$$R4 \geq 0,3617439;$$

$$R4 \leq 1;$$

$$R5 \geq 0,3764912;$$

$$R5 \leq 1;$$

$$R6 \geq 0,2577416$$

$$R6 \leq 1;$$

$$R7 \geq 0,3877949;$$

$$R7 \leq 1;$$

$$R8 \geq 0,3194156;$$

$$R8 \leq 1;$$

$$R9 \geq 0,4696909;$$

$$R9 \leq 1;$$

$$R10 \geq 0,3961759;$$

$$R10 \leq 1;$$

Dengan menggunakan perangkat lunak *Lingo* 17.0 diperoleh optimasi keandalan masing-masing peralatan turbin gas sebagai berikut:

Tabel 5. 2 Hasil optimasi keandalan

No	Keandalan Equipment	Target Keandalan System (RG)		
		0,7	0,8	0,9
1	R1 (Turbin)	0,9585886	0,9738871	0,9875842
2	R2 (<i>Rotor cooling air</i>)	0,9585799	0,9738816	0,9875816
3	R3 (<i>Exciter set</i>)	0,9599574	0,9747570	0,9880007
4	R4 (<i>Generator</i>)	0,9599921	0,9747790	0,9880112
5	R5 (<i>Combuster shell</i>)	0,9637759	0,9771812	0,9891601
6	R6 (<i>Main transformer</i>)	0,9634290	0,9769611	0,9890549
7	R7 (<i>Piping fuel gas supply</i>)	0,9676077	0,9796101	0,9903203
8	R8 (<i>Main lube oil system</i>)	0,9690866	0,9805466	0,9907672
9	R9 (<i>Compressor</i>)	0,9741314	0,9837370	0,9922880
10	R10 (<i>Digital controller</i>)	0,9746363	0,9840560	0,9924399

Berdasarkan alokasi keandalan optimal peralatan turbin gas pada tabel 5.1, maka perlu diterapkan strategi untuk menaikkan keandalan masing-masing peralatan turbin gas. Salah satu strategi untuk meningkatkan keandalan peralatan turbin gas adalah dengan melakukan penggantian komponen kritis pada masing-masing peralatan dan melaksanakan pemeliharaan pencegahan secara rutin. Salah satu contoh pada peralatan *combuster shell*, dilakukan penggantian atau *repair nozzle* bahan bakar gas. Pada peralatan *main transformer* dilakukan penggantian atau peremajaan sensor sistem proteksi. Dengan dilakukan penggantian komponen kritis pada masing-masing peralatan, diharapkan target keandalan yang dialokasikan pada masing-masing peralatan turbin gas bisa tercapai.

Selanjutnya, berdasarkan hasil optimasi keandalan pada tabel 5.2 dengan menggunakan perangkat lunak *Weibull++6* dapat diperoleh interval waktu pemeliharaan optimal sebagai berikut:

Tabel 5. 3 Interval waktu pemeliharaan optimal

No	Keandalan Equipment	Interval waktu pemeliharaan optimal (jam)		
		0,7	0,8	0,9
1	R1 (Turbin)	408,947	382,059	361,509
2	R2 (<i>Rotor cooling air</i>)	434,571	390,650	357,122
3	R3 (<i>Exciter set</i>)	190,701	121,048	58,494
4	R4 (<i>Generator</i>)	161,150	119,035	82,736
5	R5 (<i>Combuster shell</i>)	506,853	325,340	160,053
6	R6 (<i>Main transformer</i>)	1077,850	1074,923	1073,338
7	R7 (<i>Piping fuel gas supply</i>)	235,896	156,439	81,085
8	R8 (<i>Main lube oil system</i>)	1169,542	1130,133	1101,511
9	R9 (<i>Compressor</i>)	287,629	173,715	77,526
10	R10 (<i>Digital controller</i>)	188,691	128,111	68,950

5.2 Analisa Biaya Pemeliharaan

Biaya pemeliharaan menurut (Lewis, 1987) dikelompokkan menjadi dua, yaitu biaya akibat kerusakan peralatan (C_f) dan biaya perawatan terencana (C_p). Biaya yang ditimbulkan dari kerusakan peralatan (C_f) adalah biaya yang terjadi akibat kerusakan komponen kritis yang diluar perkiraan yang mengakibatkan kerugian pendapatan perusahaan. Biaya ini terdiri dari biaya suku cadang, biaya akibat kehilangan pendapatan dan biaya tenaga kerja yang dihitung sebagai berikut:

$C_f = [(Biaya \text{ tenaga kerja} + \text{Kehilangan pendapatan akibat kerusakan}) \times \text{Rata – rata waktu penggantian}] + \text{biaya pembelian suku cadang komponen}.$

Biaya perawatan terencana (C_p) merupakan biaya yang terjadi karena adanya perawatan terencana yang dijadwalkan perusahaan. Dalam perhitungan ini biaya kehilangan pendapatan akibat kerusakan tidak termasuk:

$C_p = [(Biaya \text{ tenaga kerja} \times \text{Rata – rata waktu penggantian}) + \text{biaya pembelian suku cadang komponen}].$

Data *input* yang digunakan untuk perhitungan biaya pemeliharaan adalah *Work Order* (WO) unit turbin gas blok 2, mulai tahun 2013 sampai dengan 2017 dan data kinerja perusahaan dari bidang Niaga. Selanjutnya dilakukan perhitungan biaya pemeliharaan sebelum dilakukan optimasi keandalan unit turbin gas.

Tabel 5. 4 Biaya pemeliharaan sebelum dilakukan optimasi keandalan

No	Equipment	Waktu perbaikan (jam)	Biaya tenaga kerja per-jam	Biaya penggantian komponen	Biaya akibat kerusakan (C _f)	Biaya pemeliharaan terencana (C _p)
1	Turbin	6,00	IDR 125.000,00	IDR 80.124.582,64	IDR 227.874.582,64	IDR 80.874.582,64
2	<i>Rotor cooling air</i>	5,25	IDR 125.000,00	IDR 41.780.000,00	IDR 171.061.250,00	IDR 42.436.250,00
3	<i>Exciter set</i>	5,00	IDR 100.000,00	IDR 48.259.915,00	IDR 171.259.915,00	IDR 48.759.915,00
4	<i>Generator</i>	4,00	IDR 75.000,00	IDR 38.648.000,00	IDR 136.948.000,00	IDR 38.948.000,00
5	<i>Combuster shell</i>	4,00	IDR 100.000,00	IDR 60.831.718,42	IDR 159.231.718,42	IDR 61.231.718,42
6	<i>Main transformer</i>	5,00	IDR 100.000,00	IDR 43.727.500,00	IDR 166.727.500,00	IDR 44.227.500,00
7	<i>Piping fuel gas supply</i>	3,00	IDR 100.000,00	IDR 42.865.742,11	IDR 116.665.742,11	IDR 43.165.742,11
8	<i>Main lube oil system</i>	3,50	IDR 75.000,00	IDR 14.880.000,00	IDR 100.892.500,00	IDR 15.142.500,00
9	<i>Compressor</i>	4,00	IDR 75.000,00	IDR 45.750.000,00	IDR 144.050.000,00	IDR 46.050.000,00
10	<i>Digital controller</i>	3,00	IDR 100.000,00	IDR 45.288.333,33	IDR 119.088.333,33	IDR 45.588.333,33

Setelah dilakukan optimasi keandalan, diperoleh interval waktu pemeliharaan pencegahan yang optimal pada tabel 5.3. Dengan melakukan pemeliharaan pencegahan sesuai dengan hasil perhitungan interval waktu pemeliharaan optimal, diharapkan dapat meningkatkan keandalan peralatan turbin gas. Sedangkan total biaya pemeliharaan dari suatu komponen untuk kurun waktu tertentu, menurut (Lewis, 1987) dapat digunakan persamaan 2.27 sebagai berikut:

$$C = ((1-R(t)) \times C_f) + (R(t) \times C_p)$$

Dimana :

C = Total biaya pemeliharaan

R(t) = Keandalan system dalam kurun waktu t

C_f = Biaya yang timbul akibat kerusakan mendadak

C_p = Biaya perawatan terencana

Berikut hasil perhitungan biaya pemeliharaan setelah dilakukan optimasi keandalan:

Tabel 5. 5 Biaya pemeliharaan setelah optimasi keandalan

No	Equipment	Total biaya setelah optimasi keandalan		
		Target keandalan (RG = 0,7)	Target keandalan (RG = 0,8)	Target keandalan (RG = 0,9)
1	Turbin	IDR 86.962.058,44	IDR 84.713.178,94	IDR 82.699.705,24
2	<i>Rotor cooling air</i>	IDR 47.763.910,36	IDR 45.795.729,20	IDR 44.033.566,70
3	<i>Exciter set</i>	IDR 53.665.133,50	IDR 51.852.182,50	IDR 50.229.829,25
4	<i>Generator</i>	IDR 42.868.774,20	IDR 41.419.658,00	IDR 40.122.902,40
5	<i>Combuster shell</i>	IDR 64.781.680,22	IDR 63.467.960,82	IDR 62.294.028,62
6	<i>Main transformer</i>	IDR 48.707.447,50	IDR 47.049.765,25	IDR 45.568.274,75
7	<i>Piping fuel gas supply</i>	IDR 45.546.576,16	IDR 44.664.399,76	IDR 43.877.200,06
8	<i>Main lube oil system</i>	IDR 17.793.324,05	IDR 16.810.629,05	IDR 15.934.212,60
9	<i>Compressor</i>	IDR 48.585.122,80	IDR 47.643.774,00	IDR 46.805.776,00
10	<i>Digital controller</i>	IDR 47.452.565,28	IDR 46.760.217,33	IDR 46.144.000,68

Dari data di atas dapat terlihat semakin tinggi keandalan suatu peralatan maka biaya pemeliharaan semakin kecil, hal tersebut dikarenakan semakin tinggi suatu keandalan peralatan maka frekuensi kegagalan semakin kecil, biaya yang dikeluarkan untuk pemeliharaan juga semakin kecil. Dengan semakin kecilnya biaya pemeliharaan maka diperoleh *saving* atau penghematan biaya pemeliharaan setelah dilakukan optimasi keandalan. Berikut penghematan biaya pemeliharaan dengan melakukan optimasi keandalan:

Tabel 5. 6 Penghematan biaya pemeliharaan

No	Equipment	Total penghematan setelah optimasi keandalan		
		Target keandalan (RG = 0,7)	Target keandalan (RG = 0,8)	Target keandalan (RG = 0,9)
1	Turbin	IDR 140.912.524,20	IDR 143.161.403,70	IDR 145.174.877,40
2	<i>Rotor cooling air</i>	IDR 123.297.339,64	IDR 125.265.520,80	IDR 127.027.683,30
3	<i>Exciter set</i>	IDR 117.594.781,50	IDR 119.407.732,50	IDR 121.030.085,75
4	<i>Generator</i>	IDR 94.079.225,80	IDR 95.528.342,00	IDR 96.825.097,60
5	<i>Combuster shell</i>	IDR 94.450.038,20	IDR 95.763.757,60	IDR 96.937.689,80
6	<i>Main transformer</i>	IDR 118.020.052,50	IDR 119.677.734,75	IDR 121.159.225,25
7	<i>Piping fuel gas supply</i>	IDR 71.119.165,95	IDR 72.001.342,35	IDR 72.788.542,05
8	<i>Main lube oil system</i>	IDR 83.099.175,95	IDR 84.081.870,95	IDR 84.958.287,40
9	<i>Compressor</i>	IDR 95.464.877,20	IDR 96.406.226,00	IDR 97.244.224,00
10	<i>Digital controller</i>	IDR 71.635.768,05	IDR 72.328.116,00	IDR 72.944.332,65

Dari data tabel 5.6 terlihat bahwa semakin tinggi target keandalan, maka *saving* atau penghematan biaya pemeliharaan juga semakin besar, meskipun perusahaan terlebih dahulu mengeluarkan biaya investasi untuk melakukan penggantian komponen peralatan turbin gas dan pemeliharaan pencegahan yang lebih intensif. Keandalan peralatan turbin gas yang tinggi, diharapkan dapat mengurangi frekuensi kegagalan sistem turbin gas. Sehingga dengan berkurangnya frekuensi kegagalan, kerugian yang diakibatkan oleh kegagalan turbin gas berupa *loss production* dan biaya pemeliharaan ketika terjadi *breakdown* akan berkurang. Pada peralatan turbin gas dengan target keandalan sebesar 0,7 diperoleh penghematan sebesar IDR 140.912.524,20; selanjutnya dengan target keandalan sebesar 0,8 diperoleh penghematan sebesar IDR 143.161.403,70 dan pada saat target keandalan sebesar 0,9 diperoleh penghematan sebesar IDR 145.174.877,40. Maka dapat disimpulkan bahwa dengan dilakukan optimasi keandalan pada peralatan turbin gas dapat mengurangi atau *saving* biaya pemeliharaan di perusahaan PT. Z.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 6

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisa yang dilakukan pada penelitian ini, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Peralatan turbin gas yang masuk peringkat sepuluh besar *Maintenance Prioritization Index* (MPI) adalah Turbin, *Rotor cooling air*, *Exciter set*, Generator, *Combuster shell*, *Main transformer*, *Piping fuel gas supply*, *Main lube oil system*, *Compressor* dan *Digital controller*.
2. Keandalan *residual* peralatan turbin gas sebelum dilakukan optimasi keandalan tertinggi adalah *Compressor* yaitu sebesar 0,596 dan nilai keandalan terendah pada peralatan *Main Transformer* (MTR) yaitu sebesar 0,258.
3. Interval waktu pemeliharaan pencegahan yang terpanjang setelah dilakukan optimasi keandalan, dengan target keandalan sebesar 0,9 adalah peralatan *Main lube oil system* (MOT) yaitu 1101,5112 jam.
4. Interval waktu pemeliharaan pencegahan yang terpendek setelah dilakukan optimasi keandalan, dengan target keandalan sebesar 0,9 adalah peralatan *Rotor Cooling Air* (RCA) yaitu 58,4944 jam.
5. Dengan target optimasi keandalan 0,7 ; 0,8 dan 0,9 berdasarkan hasil analisa optimasi keandalan dan biaya pemeliharaan, semakin tinggi target keandalan maka biaya pemeliharaan semakin kecil.
6. Total penghematan biaya pemeliharaan pencegahan terbesar dengan target keandalan sebesar 0,9 adalah peralatan turbin dengan total penghematan biaya pemeliharaan sebesar IDR 145.174.877,40.

6.2 Saran

Berikut saran dari hasil penelitian di PT. Z:

1. Untuk penentuan interval pemeliharaan pencegahan di PT. Z dapat menggunakan hasil analisa penelitian ini, sehingga keandalan peralatan turbin gas bisa lebih baik dan diperoleh penghematan biaya pemeliharaan.
2. Untuk penelitian selanjutnya sebaiknya dilakukan analisa keandalan komponen semua peralatan turbin gas dengan membuat *Reliability Block Diagram* (RBD) dengan menggunakan perangkat lunak yang lebih *powerfull* seperti *Reliasoft* versi terbaru.

DAFTAR PUSTAKA

Annual Report PT. PJB, Tahun 2012.

Assauri, S., (1999); *Manajemen Produksi dan Operasi*, Edisi Revisi, LPFEUI, Jakarta.

David, J. S., (2011), *Reliability, Maintainability, and Risk: Practical Methods for Engineers*, Butterworth-Heinemann, Boston.

Dhillon, B. S., (2006), *Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers*, CRC, Ottawa, Ontario.

Hardiyanto, Ekwana., (2017), *Penentuan Interval Waktu Perawatan Pencegahan pada Peralatan Gas Compression System di PT Pertamina Hulu Energi*, Tesis yang tidak dipublikasikan, Program Studi Magister Manajemen Teknologi ITS, Surabaya.

Lewis, E. E., (1998), *Introduction to Reliability Engineering*, John Wiley & Sons, First Edition, New York.

Mettas, A., (2000), *Reliability Allocation and Optomization for Complex System*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Los Angeles.

Pratama, R.A., (2018), *Analisis Keandalan Sebagai Dasar Optimalisasi Internal Pemeliharaan Control Valve HP Main Level Steam Drum PLTGU PT PJB UP Gresik*, Tesis yang tidak dipublikasikan, Program Studi Magister Manajemen Teknologi ITS, Surabaya.

Vishnu, C.R., (2016), *Reliability Based Maintenance Strategy Selection in Process Plants*, National Institute of Technology Calicut, India.

Suhandoko, Edi., (2011), *Penentuan Interval Waktu Pemeliharaan Pencegahan dengan Meminimalkan Laju Biaya Berdasarkan Alokasi dan Optimasi Keandalan pada Peralatan Seksi Penggilingan*, Tesis yang tidak

dipublikasikan, Program Studi Magister Manajemen Teknologi ITS, Surabaya.

Suharjito., (2011), *Penentuan interval waktu perawatan Peralatan pada Sistem Plant-1 dengan Meminimalkan Laju Biaya Total Perawatan*, Tesis yang tidak dipublikasikan, Program Studi Magister Manajemen Teknologi ITS, Surabaya.

System and Equipment Reliability Prioritization report PT. PJB UP Gresik, Tahun 2017.

Vilarinho, Sandrina., (2017), *Preventive maintenance decisions through maintenance optimization models*, FAIM2017, Modena, Italia.

Wijaya, Bayu., (2018), *Penentuan Interval Waktu Pemeliharaan Pencegahan Berdasarkan Metode Alokasi dan Optimasi Keandalan pada Peralatan Sub Unit Sistem Sirkulasi Air dan Uap di Blok 1 (Studi Kasus di PT. XYZ)*, Tesis yang tidak dipublikasikan, Program Studi Magister Manajemen Teknologi ITS, Surabaya.

Work flow System Equipment Reliability Prioritization PT. PJB , Tahun 2010.

Work Order report PT. PJB UP Gresik, Tahun 2017.

LAMPIRAN

Lampiran A System & Equipment Reliability Prioritization (SERP)

No	No. KKS	Equipment	PT	OC	PQ	SF	RC	PE	RT	SCR	OCR	ACR	AFPF	MPI
1	GC21MBB10HB001	GT 2.1 - TURBIN	8	10	8	6	2	10	6	7,60	10,0	76,0	6,0	455,8
2	GC22MBB10HB001	GT 2.2 - TURBIN	8	10	8	6	2	10	6	7,60	10,0	76,0	6,0	455,8
3	GC23MBB10HB001	GT 2.3 - TURBIN	8	10	8	6	2	10	6	7,60	10,0	76,0	6,0	455,8
4	GC23MBH10BR001	GT 2.3 - ROTOR COOLING AIR	8	10	8	6	2	10	6	7,60	10,0	76,0	6,0	455,8
5	GC21MKC10GR001	GT 2.1 - EXCITER SET	8	6	8	6	6	10	8	7,56	10,0	75,6	6,0	453,6
6	GC22MKC10GR001	GT 2.2 - EXCITER SET	8	6	8	6	6	10	8	7,56	10,0	75,6	6,0	453,6
7	GC22MKA10HB001	GT 2.2 - GENERATOR (NO : 127528)	8	10	8	4	4	5	10	7,42	10,0	74,2	6,0	445,0
8	GC21MBM10AV001	GT 2.1 - COMBUSTER SHELL	8	10	6	2	2	5	6	6,20	10,0	62,0	6,0	371,9
9	GC22MBM10AV001	GT 2.2 - COMBUSTER SHELL	8	10	6	2	2	5	6	6,20	10,0	62,0	6,0	371,9
10	GC21MBH10BR001	GT 2.1 - ROTOR COOLING AIR	8	10	8	6	2	10	6	7,60	8,0	60,8	6,0	364,7
11	GC22MBH10BR001	GT 2.2 - ROTOR COOLING AIR	8	10	8	6	2	10	6	7,60	8,0	60,8	6,0	364,7
12	GC21BAC10GS001	GT 2.1 - GENERATOR CIRCUIT BREAKER (GCB)	10	10	2	6	2	10	10	7,96	10,0	79,6	4,0	318,6
13	GC21BAT10GT001	GT 2.1 & GT 2.2 - MAIN TRANSFORMER	10	10	2	6	2	10	10	7,96	10,0	79,6	4,0	318,6
14	GC22BAC10GS001	GT 2.2 - GENERATOR CIRCUIT BREAKER (GCB)	10	10	2	6	2	10	10	7,96	10,0	79,6	4,0	318,6
15	GC21MBD10HD001	GT 2.1 - TURBINE BEARING	8	10	8	6	2	10	6	7,60	10,0	76,0	4,0	303,9
16	GC23MKC10GR001	GT 2.3 - EXCITER SET	8	6	8	6	6	10	8	7,56	10,0	75,6	4,0	302,4
17	GC21MBP10BR001	GT 2.1 - PIPING FUEL GAS SUPPLY	10	6	2	4	2	1	4	5,03	10,0	50,3	6,0	301,7
18	GC21MKA10HB001	GT 2.1 - GENERATOR (NO : 127527)	8	10	8	4	4	5	10	7,42	10,0	74,2	4,0	296,6
19	GC23MKA10HB001	GT 2.3 - GENERATOR (NO : 127529)	8	10	8	4	4	5	10	7,42	10,0	74,2	4,0	296,6
20	GC22BRU10GU001	GT 2.2 - UNINTERRUPTED POWER SUPPLY (UPS)	8	4	4	4	2	5	2	4,55	10,0	45,5	6,0	273,1
21	GC22MBC10HB001	GT 2.2 - COMPRESSOR	8	10	6	2	2	5	6	6,20	10,0	62,0	4,0	248,0
22	GC21MBV10BB001	GT 2.1 - MAIN LUBE OIL TANK	10	4	10	6	6	5	4	6,86	6,0	41,1	6,0	246,8
23	GC21BBT10GT001	GT 2.1 - UNIT AUX TRANSFORMATOR (UAT)	8	8	2	4	2	5	8	5,87	10,0	58,7	4,0	234,7

24	GC22BBT10GT001	GT 2.2 - UNIT AUX TRANSFORMATOR (UAT)	8	8	2	4	2	5	8	5,87	10,0	58,7	4,0	234,7
25	GC21MBN10AP001	GT 2.1 - MAIN FUEL OIL PUMP	10	6	2	2	2	1	8	5,52	10,0	55,2	4,0	220,6
26	GC22MBJ10AE001	GT 2.2 - PONY & STARTING MOTOR	10	10	8	2	2	1	6	6,64	8,0	53,2	4,0	212,6
27	GC22MBN10AP001	GT 2.2 - MAIN FUEL OIL PUMP	8	6	2	2	2	1	8	5,03	10,0	50,3	4,0	201,1
28	GC22MBP10BR001	GT 2.2 - PIPING FUEL GAS SUPPLY	10	6	2	4	2	1	4	5,03	10,0	50,3	4,0	201,1
29	GC23MBN10AP001	GT 2.3 - MAIN FUEL OIL PUMP	8	6	2	2	2	1	8	5,03	10,0	50,3	4,0	201,1
30	GC23MBP10BR001	GT 2.3 - PIPING FUEL GAS SUPPLY	10	6	2	4	2	1	4	5,03	10,0	50,3	4,0	201,1
31	GC22BMA10GW001	GT 2.2 - 380 V PDCE SWITCH GEAR	8	8	2	4	2	1	4	4,91	10,0	49,1	4,0	196,5
32	GC21CJP10EB001	GT 2.1 - DIGITAL CONTROLLER (DDC)	6	10	2	4	4	1	8	5,82	8,0	46,5	4,0	186,2
33	GC22CJP10EB001	GT 2.2 - DIGITAL CONTROLLER (DDC)	6	10	2	4	4	1	8	5,82	8,0	46,5	4,0	186,2
34	GC23CJP10EB001	GT 2.3 - DIGITAL CONTROLLER (DDC)	6	10	2	4	4	1	8	5,82	8,0	46,5	4,0	186,2
35	GC21MBJ10AE001	GT 2.1 - PONY & STARTING MOTOR	8	6	2	2	2	1	6	4,61	10,0	46,1	4,0	184,5
36	GC21MBV10AP004	GT 2.1 - (JOP) JACKING OIL PUMP (A)	8	6	2	2	2	1	6	4,61	10,0	46,1	4,0	184,5
37	GC23MBJ10AE001	GT 2.3 - PONY & STARTING MOTOR	8	6	2	2	2	1	6	4,61	10,0	46,1	4,0	184,5
38	GC21BRU10GU001	GT 2.1 - UNINTERRUPTED POWER SUPPLY (UPS)	8	4	4	4	2	5	2	4,55	10,0	45,5	4,0	182,1
39	GC23MKD10HD001	GT 2.3 - GENERATOR BEARING	8	10	8	4	4	5	10	7,42	6,0	44,5	4,0	178,0
40	GC23MBV10BB001	GT 2.3 - MAIN LUBE OIL TANK	10	4	10	6	6	5	4	6,86	6,0	41,1	4,0	164,5
41	GC21BAA10GA001	GT 2.1 - GENERATOR LEADS (IPB)	10	10	2	6	2	10	10	7,96	10,0	79,6	2,0	159,3
42	GC22BAA10GA001	GT 2.2 - GENERATOR LEADS (IPB)	10	10	2	6	2	10	10	7,96	10,0	79,6	2,0	159,3
43	GC23BAA10GA001	GT 2.3 - GENERATOR LEADS (IPB)	8	10	2	6	2	10	10	7,63	10,0	76,3	2,0	152,7
44	GC23BAT10GT001	GT 2.3 - MAIN TRANSFORMER	8	10	2	6	2	10	10	7,63	10,0	76,3	2,0	152,7
45	GC21MBD10HD002	GT 2.1 - TURBINE BEARING NO.2 & THRUST	8	10	8	6	2	10	6	7,60	10,0	76,0	2,0	151,9
46	GC22MBD10HD001	GT 2.2 - TURBINE BEARING	8	10	8	6	2	10	6	7,60	10,0	76,0	2,0	151,9
47	GC22MBD10HD002	GT 2.2 - TURBINE BEARING NO.2 & THRUST	8	10	8	6	2	10	6	7,60	10,0	76,0	2,0	151,9
48	GC23MBD10HD001	GT 2.3 - TURBINE BEARING	8	10	8	6	2	10	6	7,60	10,0	76,0	2,0	151,9
49	GC23MBD10HD002	GT 2.3 - TURBINE BEARING NO.2 & THRUST	8	10	8	6	2	10	6	7,60	10,0	76,0	2,0	151,9
50	GC21MBX10BB001	GT 2.1 - CONTROL MAIN OIL TANK	10	6	2	4	2	1	4	5,03	6,0	30,2	4,0	120,7

51	GC23MBX10BB001	GT 2.3 - CONTROL MAIN OIL TANK	10	6	2	4	2	1	4	5,03	6,0	30,2	4,0	120,7
52	GC21MBR10BR001	GT 2.1 - BY PASS STACK	2	4	4	6	8	1	6	4,97	6,0	29,8	4,0	119,3
53	GC22MBR10BR001	GT 2.2 - BY PASS STACK	2	4	4	6	8	1	6	4,97	6,0	29,8	4,0	119,3
54	GC23BBT10GT001	GT 2.3 - UNIT AUX TRANSFORMATOR (UAT)	8	8	2	4	2	5	8	5,87	10,0	58,7	2,0	117,4
55	GC21BTA10GR001	GT 2.1 - BATTERY	6	8	2	6	2	1	4	4,80	6,0	28,8	4,0	115,1
56	GC21BTL10GR001	GT 2.1 - BATTERY CHARGER	6	8	2	6	2	1	4	4,80	6,0	28,8	4,0	115,1
57	GC22BTL10GR001	GT 2.2 - BATTERY CHARGER	6	8	2	6	2	1	4	4,80	6,0	28,8	4,0	115,1
58	GC23BTL10GR001	GT 2.3 - BATTERY CHARGER	6	8	2	6	2	1	4	4,80	6,0	28,8	4,0	115,1
59	GC21MBK10AE001	GT 2.1 - TURNING MOTOR	8	6	2	2	2	1	6	4,61	6,0	27,7	4,0	110,7
60	GC22MBK10AE001	GT 2.2 - TURNING MOTOR	8	6	2	2	2	1	6	4,61	6,0	27,7	4,0	110,7
61	GC22MBV10BB001	GT 2.2 - MAIN LUBE OIL TANK	10	4	10	6	6	5	4	6,86	8,0	54,8	2,0	109,7
62	GC22MBK10AU001	GT 2.2 - GEARBOX / AUXILIARY GEAR	10	10	8	2	2	1	6	6,64	8,0	53,2	2,0	106,3
63	GC22MBV10AN001	GT 2.2 - LUBE OIL VAPOR EXTRACTOR	10	10	8	2	2	1	6	6,64	8,0	53,2	2,0	106,3
64	GC22MBV10AP001	GT 2.2 - (MOP) MAIN LUBE OIL PUMP	10	10	8	2	2	1	6	6,64	8,0	53,2	2,0	106,3
65	GC22MBV10AP002	GT 2.2 - (AOP) AUXILIARY LUBE OIL PUMP	10	10	8	2	2	1	6	6,64	8,0	53,2	2,0	106,3
66	GC22MBV10AP003	GT 2.2 - (EOP) EMERGENCY LUBE OIL PUMP	10	10	8	2	2	1	6	6,64	8,0	53,2	2,0	106,3
67	GC22MBV10AP004	GT 2.2 - (JOP) JACKING OIL PUMP (A)	10	10	8	2	2	1	6	6,64	8,0	53,2	2,0	106,3
68	GC22MBV10AP005	GT 2.2 - (JOP) JACKING OIL PUMP (B)	10	10	8	2	2	1	6	6,64	8,0	53,2	2,0	106,3
69	GC22MBV10BR001	GT 2.2 - LUBE OIL PIPING & VALVES	10	10	8	2	2	1	6	6,64	8,0	53,2	2,0	106,3
70	GC22MBX10AC001	GT 2.2-CONTROL OIL COOLER	10	10	8	2	2	1	6	6,64	8,0	53,2	2,0	106,3
71	GC22MBX10AP001	GT 2.2-(MCOP) MAIN CONTROL OIL PUMP	10	10	8	2	2	1	6	6,64	8,0	53,2	2,0	106,3
72	GC22MBX10AP002	GT 2.2-(ACOP) AUXILIARY CONTROL OIL PUMP	10	10	8	2	2	1	6	6,64	8,0	53,2	2,0	106,3
73	GC22MBXBR001	GT 2.2-CONTROL OIL PIPNG	10	10	8	2	2	1	6	6,64	8,0	53,2	2,0	106,3
74	GC21BMA10GW001	GT 2.1 - 380 V PDCE SWITCH GEAR	8	8	2	4	2	1	4	4,91	10,0	49,1	2,0	98,3
75	GC21BME10GW001	GT 2.1 - 380 V MCC -EMERGENCY	8	8	2	4	2	1	4	4,91	10,0	49,1	2,0	98,3
76	GC22BME10GW001	GT 2.2 - 380 V MCC -EMERGENCY	8	8	2	4	2	1	4	4,91	10,0	49,1	2,0	98,3
77	GC23BMA10GW001	GT 2.3 - 380 V PDCE SWITCH GEAR	8	8	2	4	2	1	4	4,91	10,0	49,1	2,0	98,3
78	GC23BME10GW001	GT 2.3 - 380 V MCC -EMERGENCY	8	8	2	4	2	1	4	4,91	10,0	49,1	2,0	98,3
79	GC23BFC10GW001	GT 2.3 - 380 V MCC	8	4	2	4	2	1	2	3,95	6,0	23,7	4,0	94,7

80	GC21MBK10AU001	GT 2.1 - GEARBOX / AUXILIARY GEAR	8	6	2	2	2	1	6	4,61	10,0	46,1	2,0	92,3
81	GC21MBV10AN001	GT 2.1 - LUBE OIL VAPOR EXTRACTOR	8	6	2	2	2	1	6	4,61	10,0	46,1	2,0	92,3
82	GC21MBV10AP001	GT 2.1 - (MOP) MAIN LUBE OIL PUMP	8	6	2	2	2	1	6	4,61	10,0	46,1	2,0	92,3
83	GC21MBV10AP002	GT 2.1 - (AOP) AUXILIARY LUBE OIL PUMP	8	6	2	2	2	1	6	4,61	10,0	46,1	2,0	92,3
84	GC21MBV10AP003	GT 2.1 - (EOP) EMERGENCY LUBE OIL PUMP	8	6	2	2	2	1	6	4,61	10,0	46,1	2,0	92,3
85	GC21MBV10AP005	GT 2.1 - (JOP) JACKING OIL PUMP (B)	8	6	2	2	2	1	6	4,61	10,0	46,1	2,0	92,3
86	GC21MBV10BR001	GT 2.1 - LUBE OIL PIPING & VALVES	8	6	2	2	2	1	6	4,61	10,0	46,1	2,0	92,3
87	GC21MBX10AC001	GT 2.1-CONTROL OIL COOLER	8	6	2	2	2	1	6	4,61	10,0	46,1	2,0	92,3
88	GC21MBX10AP001	GT 2.1-(MCOP) MAIN CONTROL OIL PUMP	8	6	2	2	2	1	6	4,61	10,0	46,1	2,0	92,3
89	GC21MBX10AP002	GT 2.1-(ACOP) AUXILIARY CONTROL OIL PUMP	8	6	2	2	2	1	6	4,61	10,0	46,1	2,0	92,3
90	GC21MBXBR001	GT 2.1-CONTROL OIL PIPNG	8	6	2	2	2	1	6	4,61	10,0	46,1	2,0	92,3
91	GC23MBK10AU001	GT 2.3 - GEARBOX / AUXILIARY GEAR	8	6	2	2	2	1	6	4,61	10,0	46,1	2,0	92,3
92	GC23MBV10AN001	GT 2.3 - LUBE OIL VAPOR EXTRACTOR	8	6	2	2	2	1	6	4,61	10,0	46,1	2,0	92,3
93	GC23MBV10AP001	GT 2.3 - (MOP) MAIN LUBE OIL PUMP	8	6	2	2	2	1	6	4,61	10,0	46,1	2,0	92,3
94	GC23MBV10AP002	GT 2.3 - (AOP) AUXILIARY LUBE OIL PUMP	8	6	2	2	2	1	6	4,61	10,0	46,1	2,0	92,3
95	GC23MBV10AP003	GT 2.3 - (EOP) EMERGENCY LUBE OIL PUMP	8	6	2	2	2	1	6	4,61	10,0	46,1	2,0	92,3
96	GC23MBV10AP004	GT 2.3 - (JOP) JACKING OIL PUMP (A)	8	6	2	2	2	1	6	4,61	10,0	46,1	2,0	92,3
97	GC23MBV10AP005	GT 2.3 - (JOP) JACKING OIL PUMP (B)	8	6	2	2	2	1	6	4,61	10,0	46,1	2,0	92,3
98	GC23MBV10BR001	GT 2.3 - LUBE OIL PIPING & VALVES	8	6	2	2	2	1	6	4,61	10,0	46,1	2,0	92,3
99	GC23MBX10AC001	GT 2.3-CONTROL OIL COOLER	8	6	2	2	2	1	6	4,61	10,0	46,1	2,0	92,3
100	GC23MBX10AP001	GT 2.3-(MCOP) MAIN CONTROL OIL PUMP	8	6	2	2	2	1	6	4,61	10,0	46,1	2,0	92,3
101	GC23MBX10AP002	GT 2.3-(ACOP) AUXILIARY CONTROL OIL PUMP	8	6	2	2	2	1	6	4,61	10,0	46,1	2,0	92,3
102	GC23MBXBR001	GT 2.3-CONTROL OIL PIPNG	8	6	2	2	2	1	6	4,61	10,0	46,1	2,0	92,3
103	GC23BRU10GU001	GT 2.3 - UNINTERRUPTED POWER SUPPLY (UPS)	8	4	4	4	2	5	2	4,55	10,0	45,5	2,0	91,0

104	GC21MBC10HB001	GT 2.1 - COMPRESSOR	8	4	2	2	2	1	2	3,72	4,0	14,9	6,0	89,3
105	GC21MKD10HD001	GT 2.1 - GENERATOR BEARING	8	10	8	4	4	5	10	7,42	6,0	44,5	2,0	89,0
106	GC21MKD10HD002	GT 2.1 - GENERATOR BEARING NO.4	8	10	8	4	4	5	10	7,42	6,0	44,5	2,0	89,0
107	GC22MKD10HD001	GT 2.2 - GENERATOR BEARING	8	10	8	4	4	5	10	7,42	6,0	44,5	2,0	89,0
108	GC22MKD10HD002	GT 2.2 - GENERATOR BEARING NO.4	8	10	8	4	4	5	10	7,42	6,0	44,5	2,0	89,0
109	GC23MKD10HD002	GT 2.3 - GENERATOR BEARING NO.4	8	10	8	4	4	5	10	7,42	6,0	44,5	2,0	89,0
110	GC21MBL10AT001	GT 2.1 - INTAKE AIR FILTER	8	4	6	4	4	5	4	5,20	4,0	20,8	4,0	83,1
111	GC22MBL10AT001	GT 2.2 - INTAKE AIR FILTER	8	4	6	4	4	5	4	5,20	4,0	20,8	4,0	83,1
112	GC23MBL10AT001	GT 2.3 - INTAKE AIR FILTER	8	4	6	4	4	5	4	5,20	4,0	20,8	4,0	83,1
113	GC21MBN10BR001	GT 2.1 - MFOP PIPING & CONTROL VALVES	4	2	2	4	4	1	2	2,95	6,0	17,7	4,0	70,8
114	GC22MBN10BR001	GT 2.2 - MFOP PIPING & CONTROL VALVES	4	2	2	4	4	1	2	2,95	6,0	17,7	4,0	70,8
115	GC22MBX10BB001	GT 2.2 - CONTROL MAIN OIL TANK	10	6	2	4	2	1	4	5,03	6,0	30,2	2,0	60,3
116	GC23MBR10BR001	GT 2.3 - BY PASS STACK	2	4	4	6	8	1	6	4,97	6,0	29,8	2,0	59,7
117	GC21QFC10AT004	GT 21 INSTRUMENT AIR DRYER	4	4	4	2	2	5	4	3,72	4,0	14,9	4,0	59,6
118	GC23MBC10HB001	GT 2.3 - COMPRESSOR	8	4	2	2	2	1	2	3,72	4,0	14,9	4,0	59,6
119	GC22QFC10AT005	GT 22 INSTRUMENT AIR DRYER	4	4	4	2	2	5	4	3,72	4,0	14,9	4,0	59,6
120	GC23MBM10AV001	GT 2.3 - COMBUSTER SHELL	8	4	2	2	2	1	2	3,72	4,0	14,9	4,0	59,6
121	GC23QFC10AT006	GT 23 INSTRUMENT AIR DRYER	4	4	4	2	2	5	4	3,72	4,0	14,9	4,0	59,6
122	GC22BTA10GR001	GT 2.2 - BATTERY	6	8	2	6	2	1	4	4,80	6,0	28,8	2,0	57,5
123	GC23BTA10GR001	GT 2.3 - BATTERY	6	8	2	6	2	1	4	4,80	6,0	28,8	2,0	57,5
124	GC23MBK10AE001	GT 2.3 - TURNING MOTOR	8	6	2	2	2	1	6	4,61	6,0	27,7	2,0	55,4
125	GC21BFA10GW001	GT 2.1 - 380 V PDC SWITCH GEAR	8	4	2	4	2	1	2	3,95	6,0	23,7	2,0	47,4
126	GC21BFC10GW001	GT 2.1 - 380 V MCC	8	4	2	4	2	1	2	3,95	6,0	23,7	2,0	47,4
127	GC22BFA10GW001	GT 2.2 - 380 V PDC SWITCH GEAR	8	4	2	4	2	1	2	3,95	6,0	23,7	2,0	47,4
128	GC22BFC10GW001	GT 2.2 - 380 V MCC	8	4	2	4	2	1	2	3,95	6,0	23,7	2,0	47,4
129	GC23BFA10GW001	GT 2.3 - 380 V PDC SWITCH GEAR	8	4	2	4	2	1	2	3,95	6,0	23,7	2,0	47,4
130	GC20QFA10AN002	BLK 2.0 GT-INSTRUMENT AIR COMPRESSOR	8	6	4	4	2	1	4	4,68	4,0	18,7	2,0	37,4
131	GC21BUA10GW001	GT 2.1 - 220 V DC STARTER PANEL	4	2	2	2	2	1	2	2,30	8,0	18,4	2,0	36,8
132	GC22BUA10GW001	GT 2.2 - 220 V DC STARTER PANEL	4	2	2	2	2	1	2	2,30	8,0	18,4	2,0	36,8

133	GC23BUA10GW001	GT 2.3 - 220 V DC STARTER PANEL	4	2	2	2	2	1	2	2,30	8,0	18,4	2,0	36,8
134	GC23MBN10BR001	GT 2.3 - MFOP PIPING & CONTROL VALVES	4	2	2	4	4	1	2	2,95	6,0	17,7	2,0	35,4
135	GC21CVG10FU001	GT 2.1 - MARSHALLING CUB. (G/T BLD1 FL)	4	2	2	4	6	1	2	3,40	4,0	13,6	2,0	27,2
136	GC21CVH10FU001	GT 2.1 - MARSHALLING CUB. (G/T BLD 2 FL)	4	2	2	4	6	1	2	3,40	4,0	13,6	2,0	27,2
137	GC22CVG10FU001	GT 2.2 - MARSHALLING CUB. (G/T BLD1 FL)	4	2	2	4	6	1	2	3,40	4,0	13,6	2,0	27,2
138	GC22CVH10FU001	GT 2.2 - MARSHALLING CUB. (G/T BLD 2 FL)	4	2	2	4	6	1	2	3,40	4,0	13,6	2,0	27,2
139	GC23CVG10FU001	GT 2.3 - MARSHALLING CUB. (G/T BLD1 FL)	4	2	2	4	6	1	2	3,40	4,0	13,6	2,0	27,2
140	GC23CVH10FU001	GT 2.3 - MARSHALLING CUB. (G/T BLD 2 FL)	4	2	2	4	6	1	2	3,40	4,0	13,6	2,0	27,2
141	GC21MBU10BB001	GT 2.1 ADDITIVE TANK	10	6	2	2	2	1	8	5,52	2,0	11,0	2,0	22,1
142	GC22MBU10BB001	GT 2.2 ADDITIVE TANK	10	6	2	2	2	1	8	5,52	2,0	11,0	2,0	22,1
143	GC23MBU10BB001	GT 2.3 ADDITIVE TANK	10	6	2	2	2	1	8	5,52	2,0	11,0	2,0	22,1

Lampiran B Data *time between failure* (TBF)

1. *Time Between Failure* (TBF) peralatan turbin

No	TBF (Jam)	No	TBF (Jam)
1	2162	13	943
2	1128	14	1073
3	8047	15	433
4	2902	16	1653
5	388	17	1295
6	913	18	5816
7	811	19	7339
8	5987	20	6048
9	7418	21	4763
10	829	22	2377
11	14781	23	3047
12	2451		

2. *Time Between Failure* (TBF) peralatan *Combuster*

No	TBF (Jam)	No	TBF (Jam)
1	2600	12	15120
2	15200	13	4105
3	1680	14	10705
4	1106	15	861
5	9437	16	1657
6	959	17	6540
7	6719	18	12953
8	1714	19	8067
9	408	20	5180
10	2712	21	552
11	7464		

3. *Time Between Failure* (TBF) peralatan *Rotor Cooling Air* (RCA)

No	TBF (Jam)	No	TBF (Jam)
1	4582	10	3568
2	3482	11	140
3	14304	12	2738
4	669	13	7896
5	4538	14	1200
6	1535	15	10226

7	1007		16	552
8	3582		17	2397
9	4013		18	5322

4. *Time Between Failure (TBF) peralatan Exiter*

No	TBF (Jam)
1	3070
2	8258
3	5831
4	1742
5	2042
6	2832
7	949
8	788
9	243

5. *Time Between Failure (TBF) peralatan Generator*

No	TBF (Jam)
1	20616
2	25263
3	5231
4	6750
5	4699
6	20600
7	11778
8	10271
9	3319
10	303
11	14420
12	3856
13	9301
14	2377
15	14302

6. *Time Between Failure (TBF) peralatan Main transformer (MTR)*

No	TBF (Jam)	No	TBF (Jam)
1	10272	10	2449
2	1440	11	3094
3	1224	12	1079
4	11208	13	1493
5	1102	14	3114
6	1680	15	28584
7	1452	16	13007
8	1174	17	2570
9	2019	18	2423

7. *Time Between Failure (TBF) peralatan Fuel gas system*

No	TBF (Jam)
1	507
2	2079
3	2160
4	14930
5	1056
6	6217
7	672
8	4029
9	7249
10	4346
11	4127
12	5416

8. *Time Between Failure (TBF) peralatan Main lube oil system (MOT)*

No	TBF (Jam)
1	20496
2	5616
3	6000
4	2183
5	2782
6	1365
7	7704
8	19632
9	19754

9. *Time Between Failure (TBF) Compressor*

No	TBF (Jam)
1	24912
2	32551
3	15023
4	13176
5	6796
6	1581
7	624
8	6791
9	16680
10	11447

10. *Time Between Failure (TBF) peralatan Digital controller*

No	TBF (Jam)
1	5398
2	1506
3	3090
4	1634
5	4222
6	4273
7	575
8	2534
9	4004
10	11734
11	488

Lampiran C Optimasi keandalan dengan *Lingo*

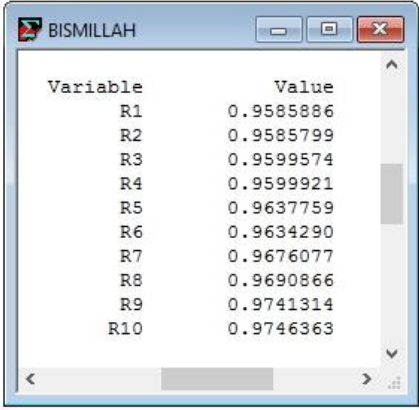
Target keandalan (RG=0,7)

Lingo Model - BISMILLAH

```
min= (0.4558195*((R1-0.3314753)/(1-R1))) + (0.4558195*((R2-0.3311889)/(1-R2))) + (0.4535574*((R3-0.372718)/(1-R3)))
+ (0.4449719*((R4-0.3617439)/(1-R4))) + (0.3719447*((R5-0.3764912)/(1-R5))) + (0.3185682*((R6-0.2577416)/(1-R6)))
+ (0.3017094*((R7-0.3877949)/(1-R7))) + (0.2468036*((R8-0.3194156)/(1-R8))) + (0.2206484*((R9-0.4696909)/(1-R9)))
+ (0.1861981*((R10-0.3961759)/(1-R10)));

R1*R2*R3*R4*R5*R6*R7*R8*R9*R10>=0.7;

R1>=0.3314753;
R1<=1;
R2>=0.3311889;
R2<=1;
R3>=0.372718;
R3<=1;
R4>=0.3617439;
R4<=1;
R5>=0.3764912;
R5<=1;
R6>=0.2577416;
R6<=1;
R7>=0.3877949;
R7<=1;
R8>=0.3194156;
R8<=1;
R9>=0.4696909;
R9<=1;
R10>=0.3961759;
R10<=1;
```



Variable	Value
R1	0.9585886
R2	0.9585799
R3	0.9599574
R4	0.9599921
R5	0.9637759
R6	0.9634290
R7	0.9676077
R8	0.9690866
R9	0.9741314
R10	0.9746363

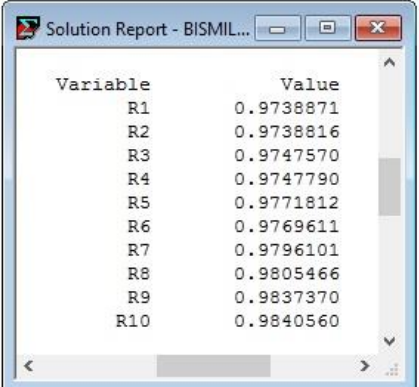
Target keandalan (RG=0,8)

Lingo Model - BISMILLAH

```
min= (0.4558195*((R1-0.3314753)/(1-R1))) + (0.4558195*((R2-0.3311889)/(1-R2))) + (0.4535574*((R3-0.372718)/(1-R3)))
+ (0.4449719*((R4-0.3617439)/(1-R4))) + (0.3719447*((R5-0.3764912)/(1-R5))) + (0.3185682*((R6-0.2577416)/(1-R6)))
+ (0.3017094*((R7-0.3877949)/(1-R7))) + (0.2468036*((R8-0.3194156)/(1-R8))) + (0.2206484*((R9-0.4696909)/(1-R9)))
+ (0.1861981*((R10-0.3961759)/(1-R10)));

R1*R2*R3*R4*R5*R6*R7*R8*R9*R10>=0.8;

R1>=0.3314753;
R1<=1;
R2>=0.3311889;
R2<=1;
R3>=0.372718;
R3<=1;
R4>=0.3617439;
R4<=1;
R5>=0.3764912;
R5<=1;
R6>=0.2577416;
R6<=1;
R7>=0.3877949;
R7<=1;
R8>=0.3194156;
R8<=1;
R9>=0.4696909;
R9<=1;
R10>=0.3961759;
R10<=1;
```



Variable	Value
R1	0.9738871
R2	0.9738816
R3	0.9747570
R4	0.9747790
R5	0.9771812
R6	0.9769611
R7	0.9796101
R8	0.9805466
R9	0.9837370
R10	0.9840560

Target keandalan (RG=0,9)

Lingo Model - BISMILLAH

```

min= (0.4558195*((R1-0.3314753)/(1-R1))) + (0.4558195*((R2-0.3311889)/(1-R2))) + (0.4535574*((R3-0.372718)/(1-R3)))
+ (0.4449719*((R4-0.3617439)/(1-R4))) + (0.3719447*((R5-0.3764912)/(1-R5))) + (0.3185682*((R6-0.2577416)/(1-R6)))
+ (0.3017094*((R7-0.3877949)/(1-R7))) + (0.2468036*((R8-0.3194156)/(1-R8))) + (0.2206484*((R9-0.4696909)/(1-R9)))
+ (0.1861981*((R10-0.3961759)/(1-R10)));

R1*R2*R3*R4*R5*R6*R7*R8*R9*R10>=0.9;

R1>=0.3314753;
R1<=1;
R2>=0.3311889;
R2<=1;
R3>=0.372718;
R3<=1;
R4>=0.3617439;
R4<=1;
R5>=0.3764912;
R5<=1;
R6>=0.2577416;
R6<=1;
R7>=0.3877949;
R7<=1;
R8>=0.3194156;
R8<=1;
R9>=0.4696909;
R9<=1;
R10>=0.3961759;
R10<=1;

```

Solution Report - BIS...

Variable	Value
R1	0.9875842
R2	0.9875816
R3	0.9880007
R4	0.9880112
R5	0.9891601
R6	0.9890549
R7	0.9903203
R8	0.9907672
R9	0.9922880
R10	0.9924399